

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS**

**Isótopos U-Pb-Hf de zircões detríticos aplicados ao estudo
de proveniência do *placer* costeiro de São José do Norte,
Rio Grande do Sul, Brasil**

MONIQUE APARECIDA MARCHESI RIZZI

ORIENTADOR – Prof. Dr. Sérgio Rebello Dillenburg

COORIENTADOR – Prof. Dr. Farid Chemale Junior

Porto Alegre, 2021

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS**

**Isótopos U-Pb-Hf de zircões detríticos aplicados ao estudo
de proveniência do *placer* costeiro de São José do Norte,
Rio Grande do Sul, Brasil**

MONIQUE APARECIDA MARCHESE RIZZI

ORIENTADOR – Prof. Dr. Sérgio Rebello Dillenburg

COORIENTADOR – Prof. Dr. Farid Chemale Junior

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Paulo César Fonseca Giannini – Universidade de São Paulo

Prof. Dr. Felipe Guadagnin – Universidade Federal do Pampa

Prof. Dr. Maria Luiza Rosa – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Dissertação de Mestrado apresentada como
requisito parcial para a obtenção do Título de
Mestre em Geociências.

Porto Alegre, 2021

CIP - Catalogação na Publicação

Rizzi, Monique Aparecida Marchese
Isótopos U-Pb-Hf de zircões detríticos aplicados ao
estudo de proveniência do placer costeiro de São José
do Norte, Rio Grande do Sul, Brasil / Monique
Aparecida Marchese Rizzi. -- 2021.

94 f.

Orientador: Sérgio Rebello Dillenburg.

Coorientador: Farid Chemale Jr..

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do
Rio Grande do Sul, Instituto de Geociências, Programa
de Pós-Graduação em Geociências, Porto Alegre, BR-RS,
2021.

1. Zircão detrítico. 2. Isótopos de U-Pb e Lu-Hf.
3. Depósitos de placer. 4. Proveniência Andina. 5.
Planície Costeira do Rio Grande do Sul. I. Dillenburg,
Sérgio Rebello, orient. II. Chemale Jr., Farid,
coorient. III. Título.

AGRADECIMENTOS

Os agradecimentos a seguir são dedicados às pessoas e instituições sem as quais não teria sido possível o desenvolvimento e conclusão desse trabalho. Vocês foram essenciais durante essa trajetória cheia de aprendizados e desafios, vivida grande parte em tempos obscuros que estarão para sempre marcados na escala do tempo humano. A pandemia do COVID-19 em conjunto com a desvalorização e o negacionismo da ciência por parte da humanidade causaram danos as mais diversas esferas da sociedade, mas apesar disso resistimos. Agradeço imensamente a todos que dê alguma forma apoiaram, encorajaram e impulsionaram minha jornada acadêmica até aqui, assim como aos que seguem inspirando a continuação dessa caminhada tão apaixonante no mundo das geociências.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), instituição que me permitiu iniciar e concluir essa etapa da minha formação acadêmica com êxito através da concessão da bolsa de estudos e sua extensão durante a pandemia.

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), ao Programa de Pós-Graduação em Geociências, ao Instituto de Geociências da UFRGS (IGEO) e ao Centro de Estudos de Geologia Costeira e Oceânica (CECO) pela acolhida durante o mestrado e toda a infraestrutura fornecida. Da mesma forma, à Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS), que foi minha casa durante toda a graduação e continuou me acolhendo durante a pós.

Aos meus orientadores, que guiaram meus passos no decorrer do mestrado, agradeço por todo apoio e conhecimento transmitido. Ao meu orientador, Prof. Dr. Sérgio Rebello Dillenburg, obrigada por ter aceitado esse desafio e me contagiado com sua paixão pela geologia costeira, pela paciência, disponibilidade, e pela autonomia concedida, essencial para o meu desenvolvimento profissional e pessoal. Ao meu coorientador, Prof Dr. Farid Chemale Junior, agradeço imensamente por ter acreditado em mim desde a graduação, pela amizade, pela parceria e dedicação no desenvolvimento desse trabalho, e por ter propiciado seu apoio logístico e financeiro junto ao Projeto Bacia de Pelotas, de sua coordenação.

À Superintendência Regional de Porto Alegre do Serviço Geológico do Brasil (CPRM), pelo acesso cedido ao Laboratório de Sedimentologia. Ao apoio proporcionado pela superintendente Dra. Lucy Takehara Chemale, que fez parte do início desse projeto ainda na graduação, me orientando e incentivando sua continuação no mestrado. Ao técnico de prospecção Luiz Alberto Costa Silva, que

auxiliou no procedimento de bateia das amostras. E ao geólogo João Wustrow, pelo auxílio em laboratório e, principalmente, pelos ensinamentos transmitidos na identificação de minerais pesados detríticos.

À Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), pela disponibilização do Laboratório de Geologia Isotópica e do Laboratório de Microscopia e Microanálises (LMic). Em especial, ao Prof. Dr. Cristiano de Carvalho Lana e a Ana Ramalho Alkmin pelo auxílio na realização das análises isotópicas de zircão.

À empresa Rio Grande Mineração (RGM) e ao geólogo Aureliano Nóbrega pela devida assistência, informações e auxílio nos trabalhos de campo iniciais.

Ao Dr. Tiago Jonathan Girelli, pela amizade e pelas infinitas formas com que contribuiu com esse trabalho. Obrigada por todo o ensinamento transmitido sobre o trabalho com zircões, pelo auxílio durante as análises isotópicas em Ouro Preto e com o processamento dos resultados, pelas vastas discussões, correções, revisões, por toda a ajuda durante a submissão do artigo e pelos diversos conselhos.

À geóloga e agora mestre Cássia Fatima Wust, minha parceira de área de trabalho desde a graduação. Obrigada pelas discussões, conselhos, por todo o apoio e amizade.

Ao Prof. Dr. Léo Afraneo Hartmann, por toda a ajuda na construção e estruturação do artigo, comentários construtivos, sugestões e revisão do inglês. Obrigada por ser uma inspiração como pessoa e profissional, pelos diversos conselhos, e por acreditar em mim e no meu trabalho.

Aos técnicos do Laboratório de Sedimentologia e Laminação da UNISINOS, por todo o auxílio na preparação das amostras. Em especial, à Monique Bordignon Chiele, pela grande ajuda nos procedimentos laboratoriais, discussões geológicas, amizade e companhia durante a árdua separação dos milhares de zircões para análise.

A todos os professores do corpo docente do PPGGEO da UFRGS que fizeram parte desta jornada pelo conhecimento transmitido, assim como aos servidores técnico-administrativos pela disponibilidade.

Aos meus pais, Ivone Fatima Marchese Rizzi e Nelson Rizzi, por aceitarem minhas escolhas, mesmo sem entender exatamente o que eu faço nessa tal geociências. Em especial à minha mãe, por acreditar em mim e no meu trabalho, por me incentivar incondicionalmente e por me auxiliar financeiramente nos momentos difíceis. Também aos meus irmãos e outros familiares que de alguma forma me apoiaram para que chegasse até aqui.

Aos colegas de pós-graduação, em especial ao pessoal da Geologia Marinha e Costeira e da Estratigrafia, obrigada pela convivência, discussões, campos, incentivo, inspirações e amizade. E finalmente, obrigada a todos os meus amigos além da pós, que me compreenderam e deram suporte emocional do início ao fim desta jornada. Sou grata a cada um de vocês!

RESUMO

Na margem passiva sul-brasileira, onde a disponibilidade de sedimentos e as condições do sistema costeiro foram adequadas para a formação de um depósito de Ti de classe mundial durante o Holoceno, poderia haver outra fonte de contribuição detrítica além do cráton? Para responder essa questão e visando estabelecer a proveniência dos minerais pesados do placer costeiro de São José do Norte (RS), análises isotópicas de U-Pb e Lu-Hf de zircões detríticos usando o método LA-ICP-MS foram realizadas. A distribuição do padrão de idades U-Pb de 866 zircões mostrou que 35,3% dos grãos pertencem ao período Neoproterozóico, que abrange o ciclo Brasileiro. No entanto, 9,1% do total de zircões analisados (até 12% em algumas amostras) correspondem a grãos mais jovens que 50 Ma, restritos ao intervalo Andino no sul da América do Sul. A assinatura Hf dos zircões se destaca por apontar pelo menos quatro grandes e distintos grupos interpretados como provenientes dos orógenos Andino, Gondwanides, Brasileiro e Grenvilliano, além de tornar possível a identificação de zircões com assinatura do Famatiniano. Assim, em uma costa de margem passiva relacionada com a quebra do Gondwana, a impressão digital andina em sedimentos detríticos confirma uma importante contribuição distal de rochas-fontes, além dos sedimentos originados no cráton. A origem andina nos depósitos de minerais pesados é uma informação onipresente para a contribuição de sedimentos distais do sistema do rio de La Plata, uma vez que seus afluentes também transportam material das montanhas andinas. Nesse contexto, o sistema de drenagens do rio La Plata associado à deriva litorânea para norte passa a ser o grande fornecedor de sedimentos para a Margem Continental Sul-brasileira e Uruguia. Enquanto isso, sistemas de drenagens proximais contribuem principalmente para a erosão das rochas do cráton (Escudo Uruguaio-Sul-Riograndense) e rochas sedimentares do Gondwana.

Palavras-chave: Zircão detrítico, Isótopos de U-Pb e Lu-Hf, Depósitos de placer, Proveniência andina, Planície Costeira do Rio Grande do Sul, Costa brasileira

ABSTRACT

On the passive margin of southern Brazil, where the availability of sediments and coastal system conditions were adequate for the formation of a placer of world-class Ti bearing in the Holocene, could there be a source of detrital contribution other than craton? To answer this question and to establish the provenance of the heavy minerals forming the coastal placer of São José do Norte (RS), analysis of isotopes U-Pb and Lu-Hf of detrital zircons using the LA-ICP-MS method were performed. The U-Pb age pattern distribution of 866 zircons showed that 35.3% of the grains belong to the Neoproterozoic period, which covers the Brazilian cycle. However, 9.1% of the total zircons analyzed (up to 12% in some samples) correspond to grains younger than 50 Ma, restricted to the Andean interval in southern South America. The Hf signature of zircons stands out by pointing at least four large and distinct groups interpreted as coming from the Andean, Gondwanides, Brasiliano, and Grenvilliano orogens, in addition to enabling the identification of zircons with the Famatinian signature. Thus, in a coast of passive margin related with the Gondwana breaking, the Andean fingerprint on detrital sediments confirms an important distal contribution of source rocks, in addition to the sediments originating from the craton. The Andean source in the heavy mineral deposits is ubiquitous information for the distal sediment contribution of the La Plata River system since its tributaries transport also material from the Andean mountains. In this context, the La Plata River drainage system associated with the coastal drift to the north becomes the high supplier of sediments to the Continental Margin of South Brazil and Uruguay. Meanwhile, the proximal drainage systems contribute mainly to the erosion of the Craton (Escudo Uruguayan-Sul-Riograndense) and Gondwana sedimentary rocks.

Key words: Detrital zircons, U-Pb and Lu-Hf isotopes, Placer deposits, Andean provenance, Rio Grande do Sul Coastal Plain, Brazilian coast

LISTA DE FIGURAS

Capítulo 1

1. Mapa geológico simplificado da PCRS, demonstrando a distribuição espacial dos sistema laguna-barreira I a IV na porção emersa da Bacia de pelotas e a localização da área de estudos marcada pelo retângulo vermelho (ver detalhe na Fig. 9) no litoral médio do Rio Grande do Sul. Adaptado de Dillenburg & Barboza (2014).19
2. Mapa de localização da Bacia de Pelotas e suas principais feições estruturais. Extraído de Rosa *et al.* (2017).....20
3. Perfil esquemático com a trajetória da linha de costa e idades dos Sistemas I a IV, relacionadas aos estágios dos isótopos de oxigênio de Ibrie *et al.* (1984), e uma tendência geral de queda do nível do mar. Extraído de Rosa *et al.* (2017).....22
4. (A) Morfologia da costa, extraído de Rosa *et al.* (2017). São evidenciados os setores progradacionais em embaiamentos (B) e os setores retrogradacionais nas projeções costeiras (C), estes caracterizados por grandes campos de dunas (imagem do satélite Landsat 7, sensor ETM + composição 7R4G2B). (D) Litoral norte em imagem oblíqua de satélite (Google Earth), incluindo a posição da linha de costa em relação ao nível máximo relativo do mar e do máximo transgressivo, mostrando seu diacronismo.23
5. Seção esquemática transversal das areias de minerais pesados de Bojuru, mostrando os limites da transgressão no Holoceno delimitados pela escarpa e a atual linha de costa onde se encontram as maiores concentrações de minerais pesados. Adaptado de Dillenburg *et al.* (2004), extraído de Wust (2021).25
6. Variações morfológicas de zircões. Todos os grãos têm entre 70 e 250 µm de tamanho. (1-21) Características morfológicas variáveis em termos de comprimento x largura e tipologia, apresentadas no contexto geral do diagrama de Pupin (1980), baseado no desenvolvimento relativo das faces prismáticas (eixo vertical) e cristal piramidal (eixo horizontal). Nestes, pode ser também observada a presença local de núcleos xenocrísticos, inclusões e o grau de fraturamento. (22) Agregado de zircão. (23) Cristal de zircão oco de paredes finas. (24) Fragmento de zircão, típico de populações extraídas de rochas máficas. (25-27) grãos reabsorvidos (zircão de couve-flor). (28-30) Grãos reabsorvidos magmaticamente sem crescimento excessivo. (31-34) Zircões sub-arredondados e multifacetados de rochas metamórficas. (35-36) Zircões relacionados ao impacto de meteoritos. Extraído de Corfu *et al.* (2003).27

7. Temperatura (T) x tempo (Δt) em um terreno hipotético de alta T de um orógeno, em uma escala (Δt) de um período não quantificado da ordem de milhões de anos. (A) metamorfismo de alto T. (B) A cristalização de magmas de alta T e o consequente crescimento de zircão podem ocorrer em diferentes intervalos, dependendo do teor de água do melt (refletindo a H₂O) ou das relações com as rochas encaixantes. (C, D) O novo zircão também pode crescer como resultado de reações de liberação de Zr pela quebra da granada (Grt) ou decomposição do rutilo (Rt). (E) Dependendo do caminho da P-T, o "resíduo" cristalizará algum novo zircão. (F) Os fluidos liberados podem causar recristalização do zircão existente. (G) Recristalização de zircão por fluidos tardios. Extraído de Harley *et al.* (2007).....28
8. Diagrama Concórdia, por amostras de zircão (adaptado de Harley & Kelly, 2007). Nesse caso, a perda variável de Pb de grãos de zircão mais antigos é decorrente dos efeitos de um segundo evento, produzindo discórdia entre a idade de formação mais antiga (4000 Ma) e a idade do segundo evento (1000 Ma).30
9. Localização das dezesseis amostras coletadas e geologia dos depósitos costeiros presentes na área de estudos. A maioria dos pontos amostrados se deu para a Barreira IV, com exceção da amostra 8, localizada na Barreira III. São destacadas na figura as amostras para as quais foram realizadas as análises isotópicas U-Pb-Hf, além da área de mineração segundo a empresa Rio Grande Mineração S.A. (RGM), detentora dos direitos minerários pela Agência Nacional de Mineração (ANM).....38
10. Metodologia de amostragem utilizada no trabalho. (A,B) Coletas de sedimento realizadas em face de praia, para a Barreira IV, representando as amostras A1 a A7; (C) Coleta realizada para sedimentos praias da Barreira III, equivalente a amostra A8; (D) Amostragem em estrada vicinal, sobre depósitos eólicos da Barreira IV, representando as amostras A9 a A16.39
11. Frações resultantes da separação de minerais pesados por susceptibilidade magnética através do Frantz. De um modo geral, todas as amostras apresentaram a mesma composição mineralógica, diferindo apenas nos teores de cada grupo mineral: para as frações magnética (Mag) verificou-se a ocorrência de magnetita e \pm hematita; para 0,1 A, titano-magnetita e \pm hematita; para 0,3 A, ilmenita, granada, turmalina, \pm epidoto e \pm anfibólio; para a fração 0,5 a mineralogia é idêntica a fração 0,3 A, com acréscimos de \pm hematita; para 0,75 A, são verificados epidoto, estauroлита, turmalina e \pm anfibólio; e para a fração de minerais não atraídos (NA) a maior diversidade entre as frações, sendo composta de zircão, rutilo, cianita,

turmalina, epidoto, \pm monazita e \pm fragmentos líticos. Apatita foi raramente identificada, enquanto leucoxênio foi verificado em várias frações, apesar da pouca concentração.....40

12. Síntese dos resultados. Diagramas de densidade probabilidade das idades U-Pb para todos os zircões analisados (A), no qual se destacam os picos com idade dos ciclos Brasileiro e Andino; e para a fração de grãos jovens, com < 50 Ma (B), onde a maioria dos grãos possuem idade inferior a 20 Ma. (C) Diagrama ϵ_{Hf} versus idades U-Pb dos zircões analisados e os ciclos orogênicos identificados: Andino, Famatiniano, Gondwanides, Brasileiro e Grenvilliano.43

Capítulo 2

1. Simplified geological maps of South America and main rivers that transported sediments from the source areas and supplied the study area at RSCP. (a) Main tectonic domains of South America and Andean volcanism, modified from Chemale Jr. et al. (2021), where (1) Southern Patagonia; (2) Patagonia; (3) Chilenia; (4) Cuyania; (5) Famatinia; (6) Arequipa; (7) Antofalla; (8) Paracas (compiled: Bahlburg et al., 2009; Cordani et al., 2016; Ramos, 2008). The geology shown inside the inset in brown and dark blue colors refers to the Uruguayan-Sul-Rio-Grandense Shield. The Pelotas Basin is limited by the Polonio (PH) and Florianópolis highs (FH) with the Rio Grande Submarine Fan (RGF). Significant sediment transport is given by the thicker arrows. (b) Geology of southern Brazil and Uruguay; simplified after Chemale Jr. (2000), Tomazelli et al. (2000), and Tapias et al. (2019). The location of Fig. 3a and, therefore, of the study area, is outlined on the map.59

2. Simplified geological map of Rio Grande do Sul Coastal Plain, demonstrating the spatial distribution of deposits in the emerged portion of Pelotas Basin. The location of Fig. 3a is outlined on the map. Adapted from Dillenburg and Barboza (2014).61

3. (a) Geological map of the study area on RSCP, with the location of samples dated by U-Pb in detrital zircons. Geology is based on maps from the Center for the Study of Coastal and Oceanic Geology (CECO), from UFRGS. This region covers deposits of the Barrier-Lagoon III and IV systems. (b) Detail for selected heavy minerals from the sample collected on the backshore. In general, all samples show similar mineralogical compositions differing only in the relative content between each other. In the figure: 1 = magnetite; 2 = titanium-magnetite; 3 = hematite; 4 = ilmenite; 5 = garnet; 6 = tourmaline; 7 = epidote; 8 = amphibole; 9 = leucoxene; 10 = staurolite; 11 = kyanite; 12 = zircon; 13 = monazite; 14 = rutile; 15 = lithic fragment. (c) Surface

with exposure of highly concentrated heavy minerals (black level); (d) Heavy mineral-enriched layer in the aeolian deposit; (e, f) Samples with high and low levels of heavy minerals; (g) Marine sediments of Barrier III.....63

4. RSCP zircons morphology for each sample and respective U-Pb ages and ϵ_{Hf} . A1, A2, A3, A5, and A6 are samples of BIV's backshore; A8 is a sample of BIII beach deposit; A15 and A16 are samples of the BIV eolian system. The spots of the Lu-Hf analyses were performed on the spots in the same zircon domains of the U-Pb laser analyses. Some acicular crystals were observed among the samples, referring to volcanic and/or intrusive sources of rapid crystallization. Metamorphic zircons, characterized by irregular and resorptive shapes, were also identified (Corfu et al., 2003). In addition, growth zoning with bimodal and polymodal successions, xenocrystic nuclei (revealing a later growth in a new crystallographic orientation), inclusions, and fractures are present in some grains.65

5. Probability density diagram plots of U-Pb ages of detrital zircons from the Andean interval. Note that most of the analyzed grains are younger than 20 Ma. (a) Sample A1, with 5 zircons analyzed; (b) sample A2, with 11 zircons analyzed; (c) sample A3, with 8 zircons analyzed; (d) sample A5, with 11 zircons analyzed; (e) sample A6, with 8 zircons analyzed; (f) sample A8, with 15 zircons analyzed; (g) sample A15, with 12 zircons analyzed; (h) sample A16, with 9 zircons analyzed.....66

6. U-Pb frequency plot of ages from zircons from the São José do Norte region, in the Rio Grande do Sul Coastal Plain, from the present study, and the main orogenic events in South America (An: Andean; Go: Gondwanides; Fa: Famatinian; Br: Brasileiro; Gr: Grenville; MZP: Mesoproterozoic; PLP: Paleoproterozoic; ARC: Archean). Note the prominent high-frequency peak of Andean and Brasileiro zircons. (a) Sample A1, with 97 zircons analyzed; (b) sample A2, with 120 zircons analyzed; (c) sample A3, with 127 zircons analyzed; (d) sample A5, with 101 zircons analyzed; (e) sample A6, with 105 zircons analyzed; (f) sample A8, with 118 zircons analyzed; (g) sample A15, with 110 zircons analyzed; (h) sample A16, with 73 zircons analyzed.....69

7. (a) ϵ_{Hf} versus U-Pb zircon age of the selected sample of detrital zircons from the RSCP. (b, c) Age- ϵ_{Hf} plot of normalized bivariate kernel density estimates (KDEs) using HafniumPlotter version 1.4, performed for 0 to 400 Ma (b) and 0 to 60 Ma (c), focusing on younger ages. Contours are plotted at 95% (1σ) of peak density. The

Andean, Gondwanides, Famatinian, Brasileiro, and Grenvillean orogens are identified.....	70
8. General fields for convergent (A: orange field), collisional (B: grey field), and extensional basins (C: green field), based on Cawood et al. (2012), from which it is possible to predict the tectonic setting of sedimentary packages of unknown origin, based on differences between the crystallization and depositional ages (CA – DA) of the zircons. In this diagram, extensional (including intracratonic) settings have CA – DA greater than 150 Ma in the youngest 5% of the zircons (step 1), and all convergent settings have CA – DA less than 100 Ma in the youngest 30% of zircons (step 2). Here, we compare the RSCP U-Pb zircon data (this work and data from Chemale Jr. et al. 2021) with results obtained in other regions of coastal Ti-Zr placers studied worldwide, as in Eucla Basin (Reid et al., 2013), Nataka deposits (Elias, 2016), and the Gulf of Mexico (Tapia-Fernandez et al., 2017).	77

LISTA DE QUADROS

Capítulo 1

1. Pontos fortes e fracos dos três métodos de datação U-Pb (adaptado de Schaltegger <i>et al.</i> , 2015). Fontes: [1] Schmitt <i>et al.</i> (2010), [2] Frei & Gerdes (2009), [3] Cottle <i>et al.</i> (2009).....	31
2. Síntese da metodologia utilizada.....	37

LISTA DE TABELAS

Capítulo 2

1. Distribution of tectonic intervals according to the set of samples analyzed and total zircon. At the bottom of the table, lava flows from the Serra Geral Group, the Lower Andean interval, the Brasileiro and Grenville cycles in South America are considered.....	67
---	----

SUMÁRIO

TEXTO INTEGRADOR	15
1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	16
1.1 Introdução	16
1.1.2 <i>Formulação do problema</i>	17
1.1.3 <i>Hipóteses</i>	17
1.1.4 <i>Objetivos</i>	17
1.1.5 <i>Justificativa</i>	18
1.2 Área de estudos	18
1.3 Contexto geológico	19
1.4 Estado da arte	25
1.4.1 <i>Proveniência de zircões pelos isótopos U-Pb-Hf</i>	25
1.4.2 <i>A proveniência da PCRS segundo trabalhos anteriores</i>	33
1.5 Materiais e métodos	36
1.6 Síntese dos resultados e discussão integradora	42
1.6 Considerações finais	44
Referências Bibliográficas	45
2. ARTIGO	55
2.1 Introduction	57
2.2 Geological setting	58
2.3 Methods	62
2.3.1 <i>U-Pb geochronology</i>	63
2.3.2 <i>Lu-Hf isotope analyses</i>	64
2.4 Results	65
2.5 Discussion	71
2.5.1 <i>U-Pb analysis and derivation of the zircon grains</i>	71
2.5.2 <i>Hf signature implications for RSCP zircons</i>	72
2.5.3 <i>Source areas, sediment dispersion, and related drainage systems</i>	74
2.5.4 <i>Nataka, Gulf of Mexico, Eucla Basin, and RSCP Ti-Zr placers</i>	76
2.6 Conclusions	80
References	81
ANEXO 1	90
ANEXO 2	91
ANEXO 3	92

ANEXO 4	93
ANEXO 5	94

TEXTO INTEGRADOR

A presente Dissertação está estruturada em dois capítulos principais e uma seção de Anexos, conforme a Norma 118 do Programa de Pós-Graduação em Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

O capítulo 1, inicial e introdutório, abrange a contextualização do problema e os objetivos da pesquisa, a área de estudos, o contexto geológico, o estado da arte, a metodologia usada no trabalho, uma síntese dos resultados e discussões e, por fim, as considerações finais e referências bibliográficas. A apresentação das figuras e o formato das citações no texto, assim como a lista de referências bibliográficas, segue as instruções da revista *Pesquisas em Geociências*, em acordo com a Norma 118.

O capítulo 2 compõe o corpo principal da dissertação, constituído do artigo submetido à revista *Sedimentary Geology*. A apresentação das figuras, tabelas, e referências segue as normas dessa revista.

Nos Anexos encontram-se os materiais suplementares do artigo e resumos apresentados e publicados em eventos, desenvolvidos durante o período do Mestrado.

As figuras apresentam nomenclatura na língua inglesa, em razão de o artigo integrador ter sido submetido para publicação em revista internacional.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

1.1 Introdução

Formados pela concentração mecânica de minerais pesados em um ambiente sedimentar de alta energia, os *placers* de praia podem constituir depósitos de grande valor econômico agregado. A composição dos sedimentos detríticos e a formação desses depósitos são controlados por diversos fatores, como clima, tectônica, transporte, além da abundância da área fonte e a capacidade de resistência dos minerais (Komar & Chi Wang, 1984; Morton, 1985; Addad, 2001). A presença de minerais pesados em depósitos continentais e marinho-costeiros possibilita a realização de inferências relacionadas à evolução destes ambientes através de estudos sedimentológicos e estratigráficos (Palma, 1979), como estudos de proveniência.

Determinadas espécies de minerais pesados caracterizam grupos restritos de rochas fontes, de modo que sua distribuição espacial em uma bacia de deposição permite a identificação de direções preferenciais de transporte sedimentar (Côrrea *et al.*, 2008). Por outro lado, o zircão, altamente refratário e presente nos mais diversos ambientes sedimentares, também fornece informações significativas sobre as propriedades dos magmas, tornando-se um potencial indicador de rochas fontes (Tapia-Fernandez *et al.*, 2017). Dessa forma, o estudo de conjuntos de dados isotópicos de zircão U-Pb-Hf em *placers* fornece informações que restringem a origem desses depósitos e a rota de transporte dos grãos da fonte para a bacia, esclarecendo também a proveniência de regiões costeiras vizinhas.

A costa brasileira abriga sítios com elevadas concentrações de minerais pesados em depósitos emersos, que vão desde o Pará até o Rio Grande do Sul (Santana, 1997). No sul do Brasil, na região de São José do Norte (RS), um depósito costeiro de minerais pesados de classe mundial e enriquecido em minerais de titânio foi formado durante o Holoceno tardio (Dillenburg *et al.*, 2004; Wust, 2021). Sua porção mais famosa, localizada na área do Distrito de Bujuru, possui uma reserva mineral estimada em 150 milhões de toneladas e conteúdo de minerais pesados de 4,66 a 1,02% (Munaro, 1991; Dillenburg *et al.*, 2004). Entretanto, não se conhecem as fontes que forneceram o suprimento sedimentar responsável por sua formação.

Considerando a lacuna em relação a proveniência dos depósitos de minerais pesados de São José do Norte e a alta maturidade dos sedimentos que constituem a barreira costeira, buscamos definir a origem desses depósitos quaternários e sua relação com as áreas continentais através da geocronologia de zircão detrítico,

pelos isótopos U-Pb e Lu-Hf via LA-ICP-MS. Essa solução também impacta as áreas vizinhas à Planície Costeira do Rio Grande do Sul (PCRS) e contribui para o entendimento de outros *placers* de margem passiva no mundo.

1.1.2 Formulação do problema

Na margem passiva do sul do Brasil, onde a disponibilidade de sedimentos e as condições do sistema costeiro foram adequadas para a formação de um *placer* de Ti de classe mundial no Holoceno, poderia haver outra fonte de contribuição detrítica além das fontes proximais pertencentes ao cráton?

1.1.3 Hipóteses

Os sedimentos provêm de múltiplas fontes, não exclusivamente proximais (Escudo Sul-Riograndense), podendo ter nessa região uma maior influência de fontes distais visto a alta maturidade dos sedimentos. Sendo assim, a deriva litorânea (atualmente com resultante de transporte para NE, ao largo da PCRS) tem grande importância na alimentação do depósito, podendo ser mais influente que os canais fluviais proximais. Além disso, considerando os resultados de Chemale Jr. *et al.* (2021), que estudaram a proveniência no litoral norte do Rio Grande do Sul, as áreas no sul da PCRS devem apresentar uma grande quantidade de grãos jovens de caráter distal.

1.1.4 Objetivos

O objetivo desta Dissertação é estabelecer a proveniência dos minerais pesados que formam o depósito de *placer* de São José do Norte (RS) pela metodologia de isótopos U-Pb e Lu-Hf de zircões detríticos.

Dentre os objetivos específicos é possível destacar:

- a) Estabelecer as principais fontes que supriram os sedimentos holocênicos na região do depósito, assim como as proporções das áreas fontes envolvidas, e relacionar tais resultados à extensão da barreira Holocênica ao longo da Planície Costeira do Rio Grande do Sul;
- b) Estabelecer o principal componente do transporte de sedimentos para a formação do depósito;
- c) Validar os métodos isotópicos U-Pb e Lu-Hf de zircões em estudos de proveniência de depósitos recentes (Quaternários);
- d) Comparar este estudo com outros *placers* de margem passiva no globo.

1.1.5 Justificativa

É importante conhecer as fontes que supriram os sedimentos de um depósito de *placer* mundialmente econômico e, portanto, estabelecer sua proveniência. Esse conhecimento, por consequência, contribui para o entendimento da proveniência sedimentar da costa gaúcha, já há muitos anos discutida, porém ainda não bem estabelecida. Além disso, esse estudo proporciona o entendimento de outros depósitos similares no mundo, sejam recentes ou antigos, e proporciona uma metodologia que pode ser seguida em estudos futuros de depósitos similares.

1.2 Área de estudos

O *placer*, objeto deste estudo, encontra-se situado no Litoral Médio do Rio Grande do Sul, no município de São José do Norte, a 355 km de Porto Alegre (Fig. 1). A área está inserida na porção central da PCRS, na Bacia de Pelotas, a norte da desembocadura da Laguna dos Patos, e geologicamente corresponde aos depósitos arenosos da barreira costeira do Sistema Depositional Laguna-Barreira IV.

O estudo realizado no presente focalizou de modo particular os depósitos de *placer* da barreira IV. Entretanto, também foram analisados zircões de depósitos arenosos da Barreira III ocorrentes na região.



Figura 1. Mapa geológico simplificado da PCRS, demonstrando a distribuição espacial dos sistemas laguna-barreira I a IV na porção emersa da Bacia de Pelotas e a localização da área de estudos marcada pelo retângulo vermelho (ver detalhe na Fig. 9) no litoral médio do Rio Grande do Sul. Adaptado de Dillenburg & Barboza (2014).

1.3 Contexto geológico

A área estudada corresponde a depósitos sedimentares emersos costeiros da Bacia de Pelotas (Fig. 2), uma bacia de margem passiva, preenchida por sequências clásticas continentais, transicionais e marinhas, e evoluída de um limite rifte de

(Fig. 1), designados do mais antigo ao mais recente de I a IV (Villwock *et al.*, 1986). Nesse contexto, os sedimentos do sistema de leques teriam sido retrabalhados pelos diversos eventos de transgressão e regressão que formaram os sistemas de barreiras costeiras (Tomazelli & Villwock, 2005). Seus limites longitudinais, Cabo de Santa Marta ao norte (rochas ígneas e metamórficas do escudo Pré-cambriano), e La Coronilla ao sul (rochas ígneas e metamórficas do escudo Pré-cambriano), correspondem aproximadamente aos altos estruturais que representam os limites da Bacia de Pelotas (Tomazelli *et al.*, 2006; Dillenburg & Barboza, 2014). Em geral, trata-se de uma costa ligeiramente ondulada, exposta ao mar aberto e sem descontinuidades, exceto por dois canais lagunares (Dillenburg & Barboza, 2014). Grandes corpos lacustres se inserem ao sul e na porção central, com ocorrência de corpos menores ao norte (Dillenburg *et al.*, 2004). O litoral atual apresenta uma geomorfologia bastante homogênea, que se altera somente nas proximidades da cidade de Torres, na porção norte do Rio Grande do Sul (Tomazelli *et al.*, 2000).

As idades dos Sistemas I a IV foram sugeridas pela primeira vez por Villwock e Tomazelli (1995), baseadas na curva dos estágios isotópicos de oxigênio (Shackleton & Opdyke, 1973; Imbrie *et al.*, 1984), os quais foram interpretados como representantes dos períodos de nível de mar alto. Inicialmente, foram correlacionados os estágios isotópicos MIS 11, 9, 5 e 1 (400, 325, 125 e 7 ka até recente), confirmados para os Sistemas III e IV (Poupeau *et al.*, 1988; Tomazelli *et al.*, 1998; Buchmann & Tomazelli, 2003; Dillenburg *et al.*, 2006). Entretanto, posteriormente averiguou-se que o Sistema II se desenvolveu em resposta a transgressão marinha relacionada ao estágio isotópico 7 (Lopes *et al.*, 2010, 2014), em torno de 230 ka, e a barreira I, por consequência, passou a ser correlacionada ao estágio 9, conforme a figura 3 (Rosa *et al.*, 2017). Portanto, a idade dos quatro sistemas está definida em torno de 325, 230, 125, e 8 ka (Rosa *et al.*, 2017). Recentemente, Dillenburg *et al.* (2020) apontaram em seus estudos registros de que o sul do Brasil experimentou também um nível de mar alto no estágio MIS 3, há uma idade média de 42 ka.

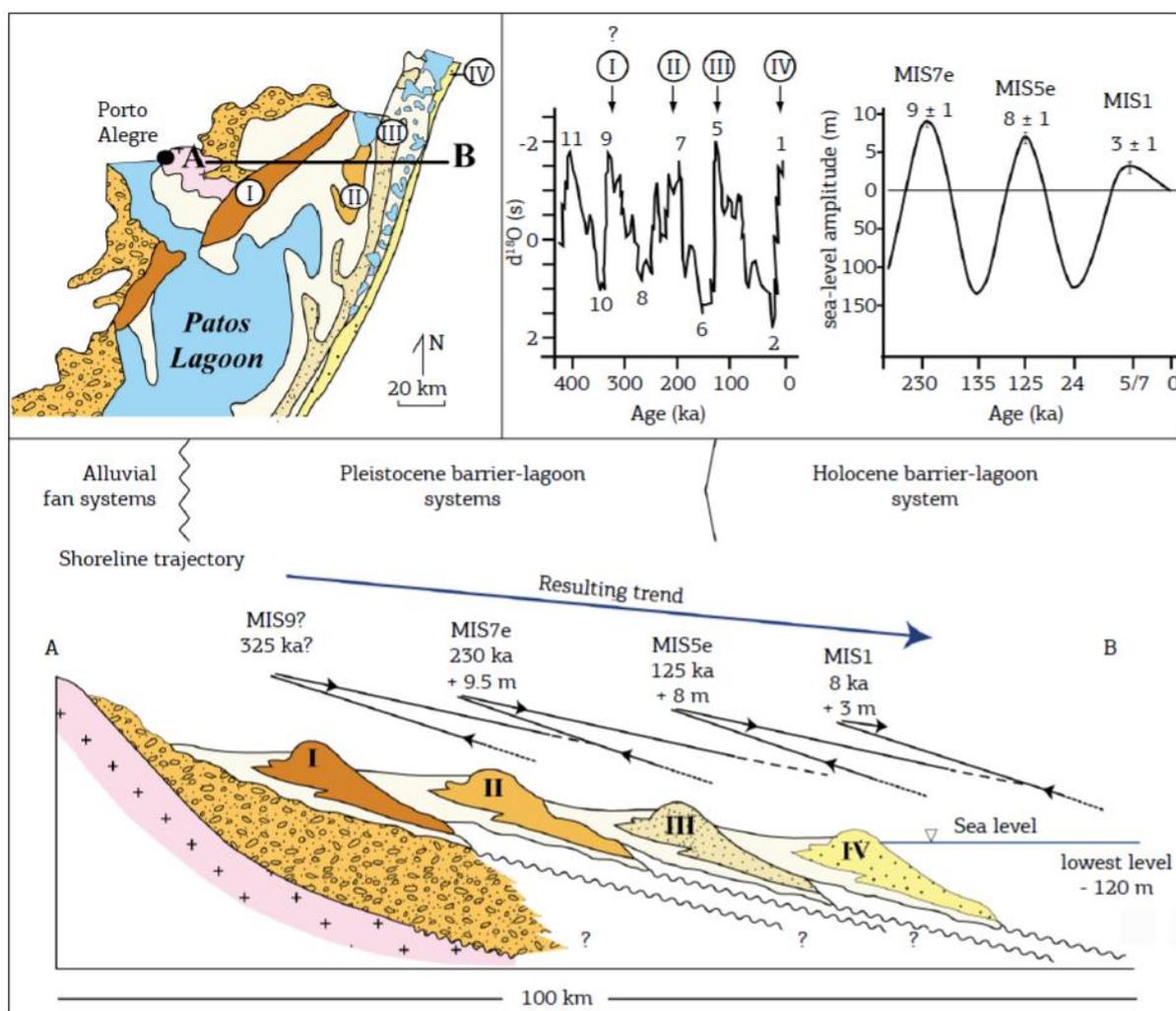


Figura 3. Perfil esquemático com a trajetória da linha de costa e idades dos Sistemas I a IV, relacionadas aos estágios dos isótopos de oxigênio de *Ibrie et al.* (1984), e uma tendência geral de queda do nível do mar. Extraído de *Rosa et al.* (2017).

Os depósitos quaternários não consolidados que compõe a PCRS não receberam contribuições modernas do continente nos últimos 6 – 5 ka, sendo a maior parte da carga transportada por rios retida nas lagoas e outros ambientes costeiros (*Tomazelli et al.*, 1998; *Toldo Jr. et al.*, 2006; *Motta et al.*, 2015). O regime de marés que compõe a costa atual é microtidal, com amplitude média de 0,5 m, sendo a costa, portanto, dominada por ondas (*Dillenburg & Barboza*, 2014). A direção da onda swell (dominante) é 180° (sul), com alturas médias de onda de 1,0 a 1,5 m (*Dillenburg et al.*, 2020). A resultante de deriva litorânea é para o norte, mas a distribuição das correntes costeiras tem um padrão bidirecional sudoeste e nordeste (*Motta et al.*, 2015). A grande influência da deriva litorânea na distribuição e deposição de areia ao longo da costa fez com que ela fosse denominada como do tipo “strike-fed” (*Dominguez*, 2009), alimentando a planície costeira por sedimentos entregues pelo rio Paraná, cuja foz está atualmente retraída no estuário do Rio de

La Plata, assim como pelos rios Jacuí e Camaquã que atualmente desaguam no Lago Guaíba e na Lagoa dos Patos (Dillenburg & Barboza, 2014). Além disso, as projeções costeiras presentes na PCRS foram erodidas nos últimos 6–5 ka, e a areia transportada para o norte contribuiu para a construção de extensas barreiras regressivas (progradacionais) ao longo dos embaiamentos costeiros (Dillenburg *et al.*, 2000; Dillenburg & Barboza, 2014) (Fig. 4).

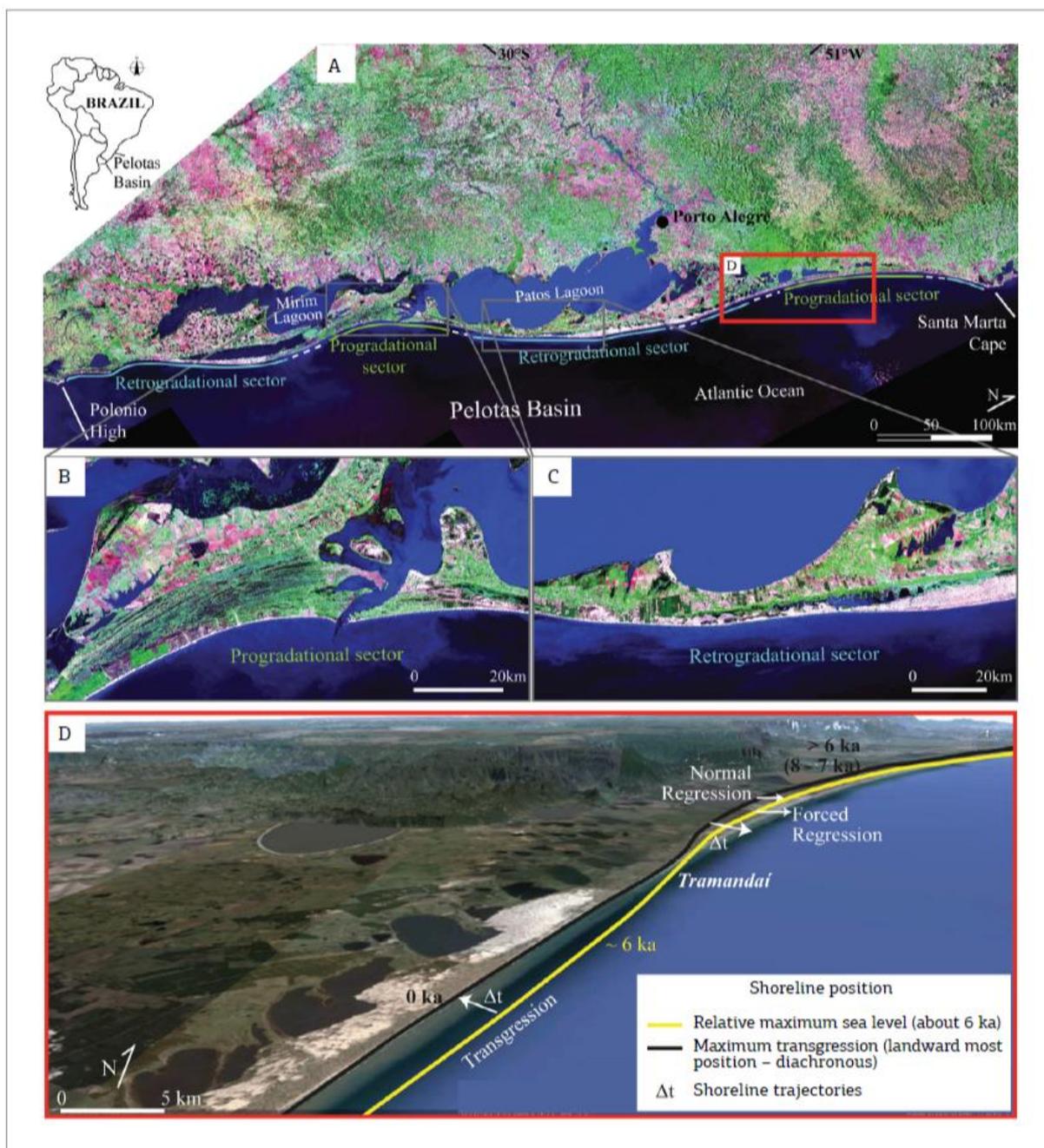


Figura 4. (A) Morfologia da costa, extraído de Rosa *et al.* (2017). São evidenciados os setores progradacionais em embaiamentos (B) e os setores retrogradacionais nas projeções costeiras (C), estes caracterizados por grandes campos de dunas (imagem do satélite Landsat 7, sensor ETM + composição 7R4G2B). (D) Litoral norte em imagem oblíqua de satélite (Google Earth), incluindo a posição da linha de costa em relação ao nível máximo relativo do mar e do máximo transgressivo, mostrando seu diacronismo.

A orla da Baía de Pelotas apresenta setores com diferentes comportamentos, com o Sistema IV apresentando padrões sincronizados progracional, gradacional e retrogradacional ao longo da costa (Tomazelli & Villwock, 1989; Dillenburg *et al.*, 2000, 2009; Barboza *et al.*, 2011; Rosa *et al.*, 2011, 2017; Rosa, 2012; Barboza & Rosa, 2014; Dillenburg & Barboza, 2014). Assim, o Sistema IV mostra setores com linha de costa transgressiva, localizados onde a linha da costa é mais projetada para o mar, e setores com linha de costa regressiva onde o litoral forma embaiamentos, conforme mostra a figura 4 (Dillenburg & Barboza, 2014; Rosa *et al.*, 2017). As transições ocorrem gradacionalmente entre os setores progracional e retrogradacional, principalmente posicionados onde a linha da costa muda sua orientação (Dillenburg & Barboza, 2014).

O *placer* estudado se destaca entre os depósitos emersos da barreira atual, tendo-se desenvolvido no Holoceno tardio (Dillenburg *et al.*, 2004), principalmente no setor retrogradacional com o potencial erosivo mais significativo no litoral do Rio Grande do Sul. O farol da Conceição, no litoral médio, situado a aproximadamente 40 km da área de estudo (Fig. 1), apresenta as maiores taxas de erosão da costa gaúcha, com uma taxa média de 3,6 m por ano (Barletta & Calliari, 2003; Parise *et al.*, 2009; Motta *et al.*, 2015). Localizado na parte sul de uma projeção costeira, o setor da barreira Holocênica em Bujuru apresenta um comportamento transgressivo (retrogradacional) de longo prazo, em consequência de um balanço negativo de sedimentos, produzido por um significativo fluxo de energia ao longo da costa, produzido pela ação de ondas de alta energia (Lima *et al.*, 2002; Dillenburg *et al.*, 2004; Dillenburg & Barboza, 2014). Lamas lagunares datadas de 4–3 ka são expostas nessa zona costeira até Lagamarzinho, e em certas partes do setor, como no Farol da Conceição, os sedimentos da barreira Pleistocênica III são expostos na praia atual (Dillenburg & Barboza, 2014).

Bujuru é um bom exemplo de uma estreita relação entre a evolução de uma barreira transgressiva e a formação de depósitos econômicos de minerais pesados (Dillenburg *et al.*, 2004; Dillenburg & Barboza, 2014) (Fig. 5). A maior proporção de minerais pesados no depósito é encontrada em dunas transgressivas, que encapsularam uma depressão da barreira costeira no Holoceno em resposta à erosão costeira de longo prazo (Dillenburg *et al.*, 2004). No entanto, altas concentrações de minerais pesados (até 30%) ocorrem em depósitos praias de pós-praia (“backshore”) e estirâncio (“foreshore”) (Dillenburg *et al.*, 2004). O conjunto de minerais pesados nas dunas transgressivas consiste em ilmenita, zircão, epidoto,

turmalina, magnetita, estauroлита, rutilo, cianita, leucóxeno e outros (Munaro, 1994; Dillenburg *et al.*, 2004; Wust, 2021). Esses grãos são bem selecionados e moderadamente a bem arredondados, com granulometria média variando de 0,062 a 0,105 mm (areia muito fina), menores que os grãos de quartzo que compõem as dunas transgressivas (0,150 a 0,210 mm - areia fina) (Munaro, 1994; Dillenburg *et al.*, 2004).

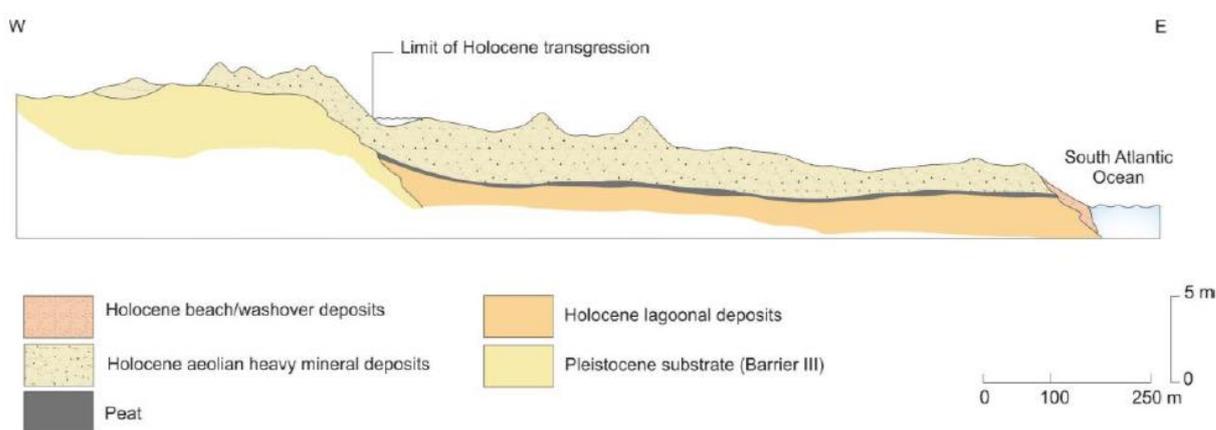


Figura 5. Seção esquemática transversal das areias de minerais pesados de Bojuru, mostrando os limites da transgressão no Holoceno delimitados pela escarpa e a atual linha de costa onde se encontram as maiores concentrações de minerais pesados. Adaptado de Dillenburg *et al.* (2004), extraído de Wust (2021).

1.4 Estado da arte

1.4.1 Proveniência de zircões pelos isótopos U-Pb-Hf

Zircão ($ZrSiO_4$) é um mineral acessório presente em rochas ígneas e metamórficas, principalmente ígneas ácidas, pegmatitos, carbonatitos, xistos e gnaisses, podendo ocorrer como grão detrítico em sedimentos e rochas sedimentares. Pode ser formado através de cristalização magmática ou processos metamórficos de temperatura moderada a alta e por processos hidrotermais ou pneumatolíticos. Possui Zr como constituinte estrutural essencial, hospedando também U, Th, Hf e REE, elementos importantes geoquimicamente para investigações petrogenéticas e geocronológicas (Hoskin & Schaltegger, 2003). Por ser um mineral muito resistente a processos químicos e físicos e possuir elevado ponto de fusão, resiste a processos metamórficos de alto grau (incluindo migmatização e anatexia), possibilitando o registro de múltiplos eventos geológicos em um único grão. Dessa forma, a ocorrência de zircão na forma de grão detrítico carrega informações sobre as idades das rochas fontes de depósitos sedimentares,

refletindo no importante uso desses minerais em estudos de proveniência. Dentre os minerais pesados, o zircão ($\gamma = 4,66 \text{ gm/cm}^3$) não é afetado pelos processos de fracionamento do ciclo sedimentar, podendo ser um dos poucos (ou únicos) minerais pesados remanescentes em rochas sedimentares e sedimentos com alta maturidade. Nestes casos, as informações sobre as composições de rochas-fonte são amplamente perdidas, mas poderão ser obtidas pela interpretação da composição do zircão (Hoskin & Schaltegger, 2003).

A menos que seja metamítico, o zircão não é passível de destruição durante o intemperismo, transporte e deposição, sobrevivendo a condições metamórficas de alto grau e até mesmo a fusão parcial da rocha hospedeira (Morton *et al.*, 1996). Estes processos podem ser registrados no mineral através de zoneamentos, formas irregulares e de reabsorção, núcleos xenocrísticos, sobrecrescimentos, inclusões e fraturas. Dessa forma, tem-se um mineral extremamente variável, tanto em morfologia externa, quanto em texturas internas (Corfu *et al.*, 2003), como é observado na figura 6. Essas características refletem a história geológica do mineral, especialmente o(s) episódio(s) relevante(s) de cristalização magmática ou metamórfica e recristalização (p.ex.: Fig. 7), tensão imposta por forças externas e por expansão de volume interno, sendo que, por vezes, tais eventos podem ser separados no tempo por milhões ou bilhões de anos (Corfu *et al.*, 2003; Hoskin & Schaltegger, 2003).

Considerando isso, a análise da tipologia de zircões levou ao estabelecimento do “Diagrama de Pupin” (Fig. 6), no qual os cristais de zircão são classificados de acordo com o desenvolvimento relativo das formas prismáticas, nas faces $\{100\}$ vs. $\{110\}$, e das formas piramidais, nas faces $\{211\}$ vs. $\{101\}$, refletidas devido ao sistema cristalino tetragonal dessa espécie mineral. Pupin (1980) relacionou o desenvolvimento relativo das faces prismáticas principalmente à temperatura de cristalização, enquanto as faces piramidais foram ligadas a fatores químicos. Assim, sugeriu que os parâmetros tipológicos de uma população de zircão podem ser usados para descrever a evolução de um sistema magmático, podendo, dessa forma, ser associados as rochas de origem quando detríticos. Nessa lógica, cristais aciculares de zircão serão comuns em rochas de rápida cristalização, como intrusões sub-vulcânicas, por exemplo, enquanto formas prismáticas serão encontradas em rochas de intrusões profundas e resfriamento lento.

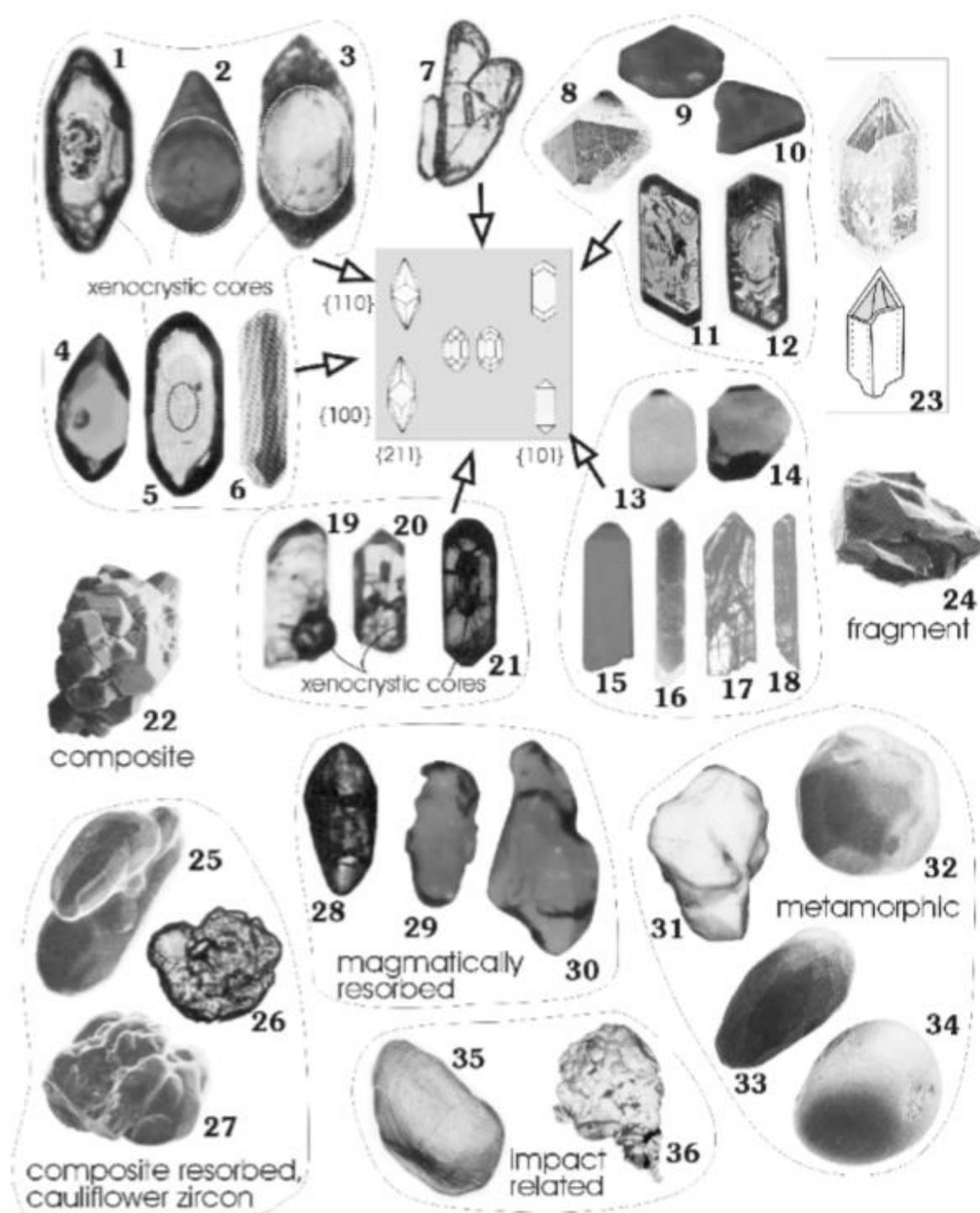


Figura 6. Variações morfológicas de zircões. Todos os grãos têm entre 70 e 250 μm de tamanho. (1-21) Características morfológicas variáveis em termos de comprimento x largura e tipologia, apresentadas no contexto geral do diagrama de Pupin (1980), baseado no desenvolvimento relativo das faces prismáticas (eixo vertical) e cristal piramidal (eixo horizontal). Nestes, pode ser também observada a presença local de núcleos xenocrísticos, inclusões e o grau de fraturamento. (22) Agregado de zircão. (23) Cristal de zircão oco de paredes finas. (24) Fragmento de zircão, típico de populações extraídas de rochas máficas. (25-27) grãos reabsorvidos (zircão de couve-flor). (28-30) Grãos reabsorvidos magmaticamente sem crescimento excessivo. (31-34) Zircões sub-arredondados e multifacetados de rochas metamórficas. (35-36) Zircões relacionados ao impacto de meteoritos. Extraído de Corfu *et al.* (2003).

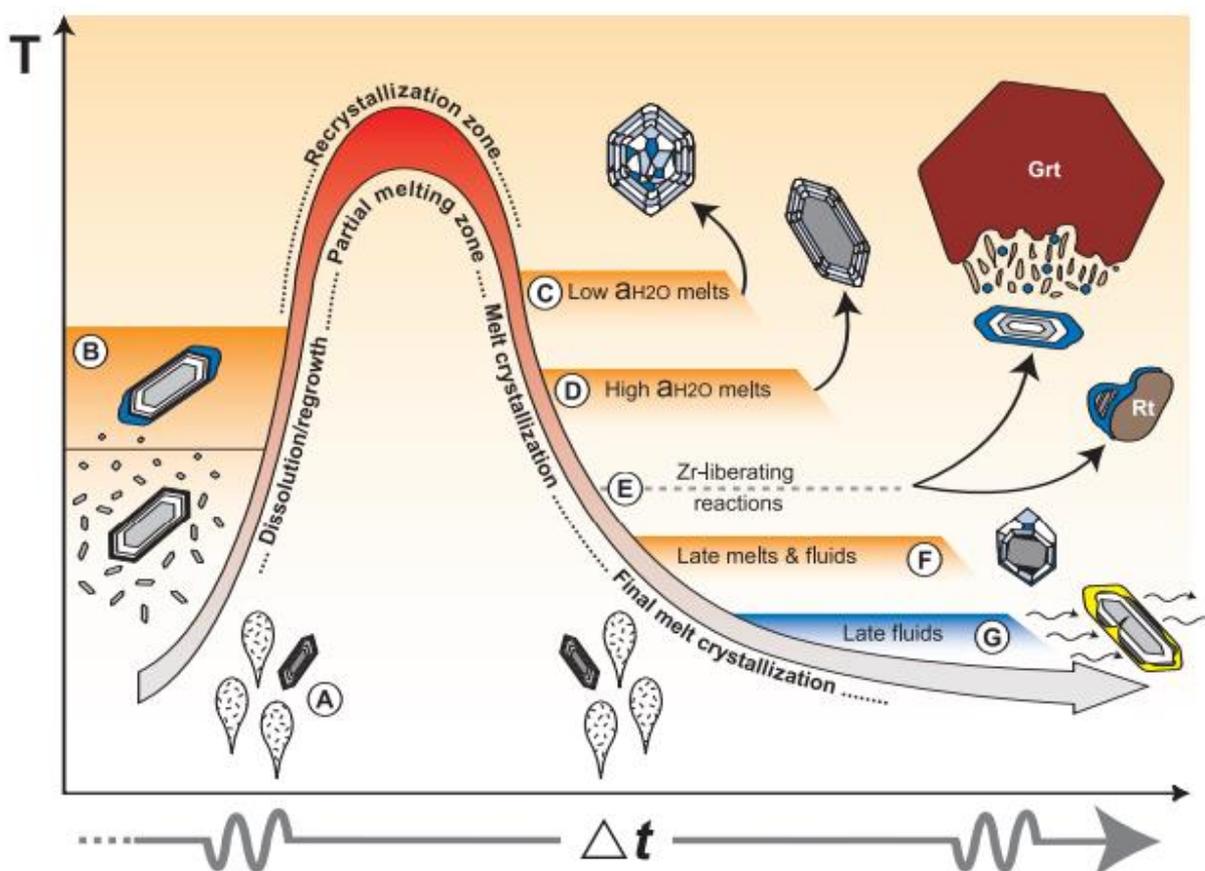


Figura 7. Temperatura (T) x tempo (Δt) em um terreno hipotético de alta T de um orógeno, em uma escala (Δt) de um período não quantificado da ordem de milhões de anos. (A) metamorfismo de alto T. (B) A cristalização de magmas de alta T e o consequente crescimento de zircão podem ocorrer em diferentes intervalos, dependendo do teor de água do melt (refletindo a H_2O) ou das relações com as rochas encaixantes. (C, D) O novo zircão também pode crescer como resultado de reações de liberação de Zr pela quebra da granada (Grt) ou decomposição do rutilo (Rt). (E) Dependendo do caminho da P-T, o "resíduo" cristalizará algum novo zircão. (F) Os fluidos liberados podem causar recristalização do zircão existente. (G) Recristalização de zircão por fluidos tardios. Extraído de Harley *et al.* (2007).

Devido as suas características, o zircão se tornou um dos minerais mais amplamente utilizados para a extração de informações sobre idade e gênese de rochas magmáticas, metamórficas e sedimentares. Grande parte da utilidade geológica do zircão deriva de sua adequação como geocronômetro com base no decaimento de U (e Th) para Pb. Datado pelo método U-Pb, o zircão destaca-se entre os minerais que contém urânio presente no retículo cristalino, visto que possui um retículo cristalino muito resistente a alterações, retendo com eficácia elementos-pai (urânio) e elementos-filho (chumbo) (Fairchild *et al.*, 2009). Além disso, o mineral apresenta temperaturas de bloqueio (temperatura em que o sistema isotópico se fecha) muito altas para o sistema isotópico U-Pb (cerca de 900°C) (Lee *et al.*, 1997).

O método U-Pb é considerado um dos mais precisos para a datação de eventos ígneos e metamórficos e, portanto, possui grande aplicação em estudos de

proveniência. Neste método, três séries distintas de decaimento isotópico são detectadas: os isótopos radioativos ^{238}U , ^{235}U e ^{232}Th , que resultam nos isótopos radiogênicos ^{206}Pb , ^{207}Pb e ^{208}Pb , respectivamente. Cada processo de decaimento envolverá várias etapas intermediárias, com isótopos intermediários de vida curta que decaem em segundos, anos décadas ou centenas de milhares de anos (Harley & Kelly, 2007). A série final é descrita através de uma única equação, relacionando o número de isótopos-pai restantes (por exemplo, ^{238}U) e o número de isótopos-filho (por exemplo, $^{206}\text{Pb}^*$) até o momento:

$$^{206}\text{Pb}^* / ^{238}\text{U} = e^{\lambda^{238} t} - 1$$

sendo, “e” a função exponencial, “t” o tempo e “λ” a constante de decaimento específico. Neste caso, $^{206}\text{Pb}^*$ refere-se à quantidade de ^{206}Pb radiogênico acumulada no cristal. Assim, $^{206}\text{Pb}^*$ é produzido pelo decaimento de ^{238}U , resultando em uma constante de decaimento $\lambda^{238} = 1,55125e^{-10}$, e uma meia vida do ^{238}U de 4468 milhões de anos. Por conseguinte, $^{207}\text{Pb}^*$ produzido a partir do decaimento de ^{235}U e $^{208}\text{Pb}^*$ produzido a partir de ^{232}Th , com $\lambda^{235} = 9,8485e^{-10}$ e $\lambda^{232} = 4,9475e^{-11}$, sendo a meia-vida do ^{235}U de 704 milhões de anos e a do ^{232}Th de 14 bilhões de anos. Em termos básicos, isso significa que em um cristal no qual foi incorporado U e Th, como o zircão, haverá três “relógios” distintos.

Cada par de isótopos fornece uma idade independente, e quando as duas coincidirem, são chamadas de idades concordantes. Num diagrama ^{238}U - ^{206}Pb vs. ^{235}U - ^{207}Pb , definida por idades concordantes, a curva concórdia representa a evolução isotópica ao longo do tempo geológico de um sistema ideal que tenha permanecido fechado (Harley & Kelly, 2007). Quando não coincidirem, as idades calculadas são chamadas de idades discordantes (devido a perdas de Pb no mineral), representadas num gráfico pelos pontos alinhados das razões isotópicas de dois pares através de uma reta, chamada discórdia (Fig. 8).

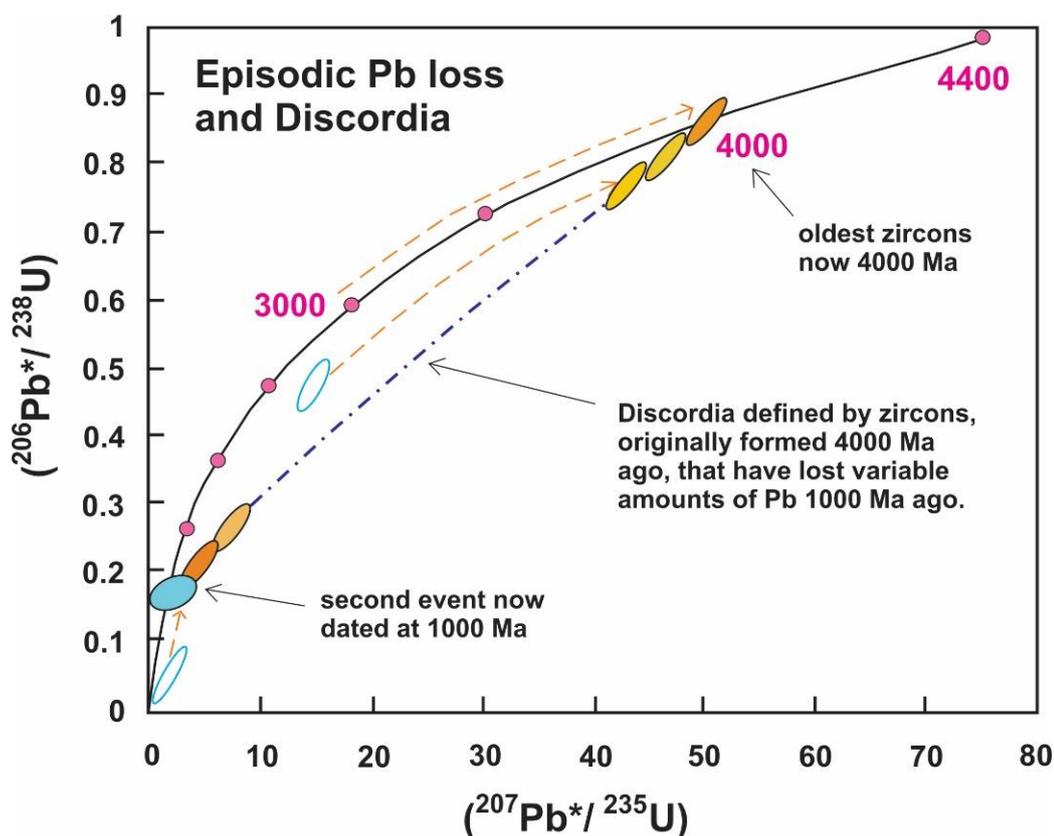


Figura 8. Diagrama Concórdia, por amostras de zircão (adaptado de Harley & Kelly, 2007). Nesse caso, a perda variável de Pb de grãos de zircão mais antigos é decorrente dos efeitos de um segundo evento, produzindo discordância entre a idade de formação mais antiga (4000 Ma) e a idade do segundo evento (1000 Ma).

Essencialmente, temos três ferramentas de datação U-Pb diferentes: uma técnica de granulação integral de alta precisão (*isotope-dilution thermal ionization mass spectrometry*, ID-TIMS) e duas de alta resolução espacial, mas menos precisas em técnicas *in situ* (*secondary ion mass spectrometry*, SIMS, e *laser ablation inductively-coupled plasma mass spectrometry*, LA-ICP-MS), todas aplicadas predominantemente em zircão. Ambas as técnicas possuem alta qualidade metodológica e tecnológica, como pode ser observado no quadro 1, abaixo. Conforme Schaltegger *et al.* (2015), a escolha para o uso de uma dessas técnicas deve ser regida pela questão científica colocada, como: a duração do processo geológico a ser resolvido; o tamanho e a abundância do material a ser analisado; a complexidade do material da amostra e da história geológica a ser resolvida; e o número de datações necessárias para resolver a questão.

Quadro 1. Pontos fortes e fracos dos três métodos de datação U-Pb (adaptado de Schaltegger *et al.*, 2015). Fontes: [1] Schmitt *et al.* (2010), [2] Frei & Gerdes (2009), [3] Cottle *et al.* (2009).

	ID-TIMS	SIMS	LA-ICP-MS
Resolução para idade radiométrica (2σ)	U-Pb alta a muito alta: $\leq 0.1\%$ de precisão e exatidão.	U-Th e U-Pb ca. 1-2%; muito alta ($\sim 10^3 - 10^4$ anos) para datações U-Th <300 ka	U-Pb ca. 2% Th-Pb ca. 3%
Resolução espacial	Fraca (mistura de domínios etários em cristais únicos dificilmente evitada)	Excelente (perfil de profundidade sub- μm); quase não destrutivo	Boa (20-30 μm lateralmente; μm único na vertical, dependendo do sistema analítico)
Rendimento útil para U	<1% (como UO^+)	$\sim 1-2\%$ (como UO^+), dependendo das espécies de feixes primários e demanda de oxigênio	Muito variável (0,01 – 2,8%), dependendo do tipo de especificação* de massa.
Rendimento útil para Pb	Alto ($\sim 5\%$), dependendo da fonte de Si-gel	Alto ($\sim 1\%$) [1]	Intermediário ($\sim 0,2\% - 0,4\%$) a alto (2%), dependendo do tipo de especificação* de massa [2]
Tempo necessário para preparação e análise de amostras	Lento (digestão e separação química)	Rápido (imageamento CL, taxa de escavação volumétrica $\sim 0.1 \mu\text{m}^3/\text{s/nA}$ no feixe primário) [1]	Muito rápido (imageamento CL, taxa de escavação volumétrica de $\sim 0.125 \mu\text{m}^3 / \text{pulso de } 4.4 \text{ J cm}^{-2}$) [3]
Aplicação geológica preferencial	Sistemas vulcânicos e plutônicos de qualquer idade	Sistemas vulcânicos jovens com enclaves vulcânicos e plutônicos; sistemas metamórficos; análises microcristalina e <i>in situ</i>	Estudos de proveniência de detriticos, sistemas vulcânicos e plutônicos jovens, sistemas metamórficos, análise <i>in situ</i>

* Rendimentos úteis em% (= íons detectados / número total de átomos no volume de amostra para uma espécie de interesse) para U e Pb, respectivamente; para quadripolo-ICP-MS: 0,01%, 0,01%; para coletor único, *sector-field* ICP-MS no setor: 0,3%, 0,2%; para multicoletor ICP-MS: 0,4-2,8%, 0,3-2%.

Para uma análise eficiente de grandes conjuntos de dados, com um nível de incerteza de $\pm 1\%$ a 2%, a datação U-Pb por LA-ICP-MS é a mais recomendada. Trata-se de uma técnica potencialmente rápida, comparativamente barata e suficientemente precisa e acurada para determinações de idades de cristais de zircão antigos (Frei & Gerdes, 2009), mas relativamente nova, se comparada à geocronologia de ID-TIMS e SIMS. Desde os estudos iniciais, o principal ponto

positivo da LA-ICP-MS tem sido reconhecido na flexibilidade e velocidade de aquisição de dados, tornando-a ideal para estudos que exigem grandes conjuntos de dados, como proveniência mineral detrítica e investigações detalhadas em cristais complexamente zonados (Chemale Jr. *et al.*, 2012; Schaltegger *et al.*, 2015). A LA-ICP-MS pode ser aplicada na geocronologia a praticamente qualquer material contendo U (apatita, allanita, carbonato, monazita, rutilo, titanita, uraninita, xenotima, zircão e outros), sendo a principal limitação a disponibilidade de materiais de referência homogêneos (Schaltegger *et al.*, 2015). O método oferece alta resolução espacial lateral semelhante ao SIMS, com tamanhos de *spots* de 25-35 μm usados para geocronologia de zircão, 50 μm se aplicado a rutilo, e até 5 μm para datação de monazita (Schaltegger *et al.*, 2015). Embora a técnica tenha desvantagens decorrentes do fracionamento de U e Pb durante a ablação, transporte e ionização, bem como dificuldade de correção precisa do Pb comum usando ^{204}Pb (devido à interferência de ^{204}Hg do gás de amostra de He e Ar usado no ICP-MS), há uma confiabilidade na datação U-Pb de grãos de zircão ígneos, metamórficos e detríticos (Frei & Gerdes, 2009).

Mais recentemente, os avanços tecnológicos permitiram a determinação precisa da composição isotópica Hf do zircão, um traçador geoquímico que forneceu detalhes importantes sobre a evolução química da Terra, em particular a evolução do sistema crosta-manto (Vervoort & Kemp, 2016). O isótopo ^{176}Lu decai pela emissão β^- para ^{176}Hf com meia-vida de ~ 37 Gyr (McNair, 1961), e a aplicação desse sistema de decaimento radioativo à geocronologia foi indicada pela primeira vez em 1970, por Boudin & Deutsch. Posteriormente, um método de separação para medição isotópica precisa Lu-Hf por espectrometria de massa de ionização térmica (TIMS) foi desenvolvido, tornando possível o uso do sistema Lu-Hf tanto como geocronômetro quanto um traçador isotópico para estudar a diferenciação crosta-manto integrada no tempo (Patchett e Tatsumoto, 1980a, 1980b, 1980c). Entretanto, sua aplicação para geocronologia e geoquímica de isótopos foi limitada até o final dos anos 1990, quando uma nova era de pesquisa isotópica Lu-Hf foi iniciada com a introdução de espectrometria de massa de plasma acoplado por coletor múltiplo indutivo (MC-ICPMS) (Iizuka *et al.*, 2017). Esta técnica que tem alta eficiência de ionização ($> 95\%$), mesmo para elementos com altos potenciais de primeira ionização ($\sim 7,5$ eV) incluindo Hf (Walder *et al.*, 1993), permitiu análises isotópicas Lu-Hf de alta precisão (2σ , $\pm <1\epsilon$) de amostras relativamente pobres em Hf (Iizuka *et al.*, 2017). Ainda, a análise in-situ através da ablação a laser (LA) da amostra

permitiu uma vantagem significativa na aquisição de informações isotópicas de Hf mais confiáveis e com alto rendimento analítico, especialmente de grãos de zircão com estrutura interna complexa (Iizuka *et al.*, 2017).

Segundo (Iizuka *et al.*, 2017), os dados de isótopos Hf para grãos de zircão são essenciais para estudar a evolução crustal-manto ao longo da história geológica, visto que: o zircão é um mineral acessório onipresente em granitóides, bem como em rochas metamórficas de alto grau; pode registrar a composição inicial do isótopo Hf no momento da cristalização devido ao seu baixo Lu/Hf e resistência à perturbação do isótopo Hf secundário; sua idade de cristalização pode ser determinada com precisão por datação U-Pb; e oferece um arquivo da formação crustal de 4,4 Ga até o presente. Essa abordagem tem sido usada não apenas para a compreensão de rochas magmáticas, mas também para observar zircões detríticos onde o contexto geológico da rocha-mãe foi perdido (Vervoort e Kemp, 2016).

1.4.2 A proveniência da PCRS segundo trabalhos anteriores

Na plataforma sul-brasileira, muitos foram os estudos envolvendo as áreas fonte de minerais pesados. Sendo assim, é apresentado a seguir um apanhado de observações e conclusões verificadas em estudos anteriores.

Ao estudar os minerais pesados da plataforma continental abrangidos na região entre o Rio Grande e o Chuí, Pomerancblum & Costa (1972) inicialmente determinaram que os sedimentos da região interna da plataforma provinham de rochas metamórficas, sendo que os da região externa eram provenientes, principalmente, de rochas básicas. Silva (1979) estudou a origem dos minerais pesados praias da mesma região, concluindo que esta assembleia mineralógica teve como área fonte primária as rochas do Escudo Sul-rio-grandense e as basálticas da formação Serra Geral. Posteriormente, Villwock *et al.* (1979), estudando as areias negras ao longo da costa do Rio Grande do Sul, propuseram que estes sedimentos seriam derivados de rochas metamórficas e ígneas do Escudo Sul-riograndense e de formações sedimentares e cobertura vulcânica de idade Paleozóica a Mesozóica, sendo estas proposições em acordo com Loss & Dehnhardt (1983).

Tomazelli (1978) classificou a plataforma continental sul-brasileira em quatro províncias diferentes a partir de seu estudo com minerais pesados: Patos, cuja fonte seriam os rios que deságuam na lagoa dos Patos; Rio-grandense externa, com fonte em rios provenientes do continente (escudo e basaltos) em épocas de nível do mar mais baixo; Platina, originada pelo rio de La Plata em níveis de mar mais baixo; e

Rio-grandense interna. Entre as areias que compõe a zona costeira moderna e, portanto, a província Rio-grandense interna, Tomazelli (1978) caracterizou a assembleia epidoto-estauroлита-cianita-zircão-turmalina-granada de alta maturidade mineralógica, para o qual a proveniência seriam rochas do Escudo Sul-riograndense. Esta fonte continental proximal foi confirmada mais tarde por um estudo específico de oligoelementos em zircões das praias modernas do Rio Grande do Sul por Barros *et al.* (2010).

A Série Projeto REMAC (Kowsmann & Costa, 1979) dividia a região do litoral gaúcho segundo as Províncias Torres e Platina. A Província Torres, composta por uma suíte de minerais pesados com predomínio da augita, apresentaria como fonte as rochas básicas costeiras da Formação Serra Geral. A Província Platina, que abrange desde a plataforma externa ao largo de Rio Grande, progressivamente em direção ao arroio Chuí, possui uma mineralogia de pesados idêntica à Província Torres. Segundo os autores do projeto, as rochas fontes primárias seriam possivelmente as mesmas, apesar de já estar o complexo básico da Formação Serra Geral bastante afastado do litoral na Província Platina. Rocha *et al.* (1975) constataram uma grande semelhança entre a suíte de pesados da plataforma continental, ao sul da Lagoa dos Patos, e da carga sedimentar transportada pelo rio de La Plata, ambas ricas em augita, e através de critérios litológicos e batimétricos, sugeriram a influência do rio na plataforma do Rio Grande do Sul. Milliman (1975) assinala como área fonte dos sedimentos nesse trecho as rochas drenadas pelo sistema fluvial do rio Paraná, cujos sedimentos desembocam no rio de La Plata, e teriam sido transportados para o norte na região da plataforma durante o último período de mar baixo. Como o Rio Paraná drena extensas áreas da Formação Serra Geral, seria essa a fonte principal das augitas da Província Platina.

Munaro (1994) analisou os minerais pesados da região de Bujuru, no litoral médio do Rio Grande do Sul, sugerindo como fonte primordial o leque deltáico associado à paleodrenagem do Rio Camaquã, na plataforma interna, sendo os sedimentos retrabalhados e redepositados no decorrer das variações eustáticas que se deram posteriormente. O autor propôs ainda que, minerais de interesse econômico, como a ilmenita, leucóxênio, rutilo, zircão e cianita, provêm das rochas do Escudo Sul-rio-grandense, enquanto a magnetita e a titano-magnetita são derivadas dos basaltos da Formação Serra Geral. Dillenburg *et al.* (2004) propõem que a formação do *placer* neste local se dá pelo retrabalhamento dos depósitos da

planície costeira pré-existentes e pela retenção de parte dos minerais pesados da deriva litorânea.

Ayup-Zouain *et al.* (2001, 2002), com base na identificação de minerais pesados em sedimentos superficiais da plataforma continental do Rio Grande do Sul, sugeriram quatro fontes de proveniência destes minerais: sedimentos de origem Pampeano-patagônico, para a porção sul; sedimentos Guaraní, formados por sistemas de drenagem do setor central do Escudo Sul-rio-grandense em direção aos basaltos, para o norte; sedimentos Gaúchos, formados por rochas metamórficas e de metamorfismo de contato; e sedimentos Platenses, derivados das rochas do Escudo Sul-riograndense e Uruguio, a partir de paleodrenagem continental adjacente ao estuário do Plata.

Corrêa *et al.* (2001) estudaram minerais pesados nos sedimentos do fundo da plataforma continental sul-brasileira e, através da composição mineralógica, propõem como fontes destes minerais: rochas metamórficas e basálticas, sedimentos pampeanos-patagônicos e rochas do Escudo Sul-riograndense e Uruguio. Posteriormente, Côrrea *et al.* (2008) ao analisarem minerais pesados abrangidos na plataforma continental do Rio Grande do Sul, Uruguai e norte da Argentina, verificaram que concentrações de pesados ocorrem em regiões submetidas à marcada influência praial ou fluvial pretérita, e identificaram quatro componentes principais: o primeiro, influenciado pela augita, predomina na parte sul da plataforma continental, evidenciando origem Pampeano-Patagônica; o segundo, influenciado pela hornblenda e hiperstênio, se dá para a parte norte da plataforma continental e na região de Bojuru e lagoa Mangueira, evidenciando sua origem a partir das paleodrenagens dos rios Jacuí, Camaquã, Jaguarão e Cebollati, com minerais provenientes de rochas ígneas básicas; o terceiro, influenciado pela associação turmalina, estaurolita, epidoto e cianita, se concentra localizado entre Chuí e Torres, com pesados típicos das rochas do Escudo Sul-Riograndense e Uruguio, principalmente rochas metamórficas; e o quarto componente, influenciado por apatita, zircão e silimanita, é distribuído no setor sul da plataforma continental, sendo os minerais relacionados a sedimentos oriundos da dispersão platense, com origem relacionada às rochas do Escudo Sul-Riograndense e Uruguio.

Segundo Dillenburg & Barboza (2014), durante os períodos de nível do mar mais baixo, a corrente litorânea transportou areias da costa da fronteira Argentina-Uruguai (aproximadamente do estuário próximo a La Plata) para a costa do Rio Grande do Sul. Ao estudar o transporte de sedimentos com base no índice de

quartzo/feldspatos (Q/F), Dillenburg (1990) observou que este índice mostra claramente o transporte para o norte dos sedimentos do sul (baixo Q/F - baixa maturidade) e sua mistura progressiva com alta maturidade sedimentos (alto Q/F) da parte norte da plataforma gaúcha. Outros estudos usando indicadores mineralógicos, geofísicos, paleontológicos e palinológicos também apontaram uma fonte sul para as areias encontradas na parte sul da plataforma continental adjacente (Urien & Ewing, 1974; Rocha *et al.*, 1975; Tomazelli, 1978; Lorscheitter & Romero, 1985). Portanto, para Dillenburg & Barboza (2014), o rio Paraná foi importante no preenchimento sedimentar da bacia de Pelotas na porção sul da margem continental do Rio Grande do Sul, enquanto os rios Camaquã e Jacuí foram ativos nas porções central e norte da bacia.

Por fim, estudos recentes têm demonstrado uma influência ainda maior do rio de La Plata na PCRS. Carassai *et al.* (2019) ao estudar índices de minerais pesados das barreiras quaternárias apontam duas fontes distintas: uma proximal, de alimentação direta, porém subordinada, cuja contribuição abrange o Escudo do Rio Grande do Sul e a Bacia do Paraná, associada a drenagens proximais; e uma segunda fonte, distal e principal, associada a bacia de drenagens do Rio de La Plata, que estaria a mais de 700 km ao sul da área estudada no litoral norte, e que drena a metade norte da Bacia do Paraná e a divisa com os Andes. Seguindo a mesma linha, Chemale Jr. *et al.* (2021) em estudos de geocronologia U-Pb de zircões detríticos do litoral norte apontam a rede de drenagens do rio de La Plata como o principal responsável por transportar os sedimentos que compõe a PCRS e o Cone de Rio Grande (Martins, 1984). Segundo os autores, as drenagens que compõe a bacia do rio de La Plata drenam os terrenos do embasamento andino (como Grenviliano, Famatiniano e Gondwanides) e unidades Meso-Cenozóicas Andinas, como também rochas Pré-Cambrianas e camadas Mesozóicas e Paleozóicas da plataforma Sul-Americana. O suprimento sedimentar proximal provindo do embasamento do Rio Grande do Sul seria, portanto, um componente menor, uma vez que a maioria desses sedimentos tende a ser transportada para o norte na deriva litorânea.

1.5 Materiais e métodos

Para a obtenção dos resultados desta pesquisa, foram selecionadas metodologias compatíveis com os objetivos, passando pelo levantamento

bibliográfico e de dados, trabalho de campo e análises laboratoriais. A seguir é apresentado uma descrição dos métodos utilizados, os quais foram sintetizados no quadro 2.

Quadro 2. Síntese da metodologia utilizada.

Método	Quantidade	Equipamento	Especificações
Trabalho de campo e amostragem	16 amostras	Cano PVC com 10 cm de diâmetro e marcação de 30 cm de altura	Amostras com volume de 2356 cm ³ de areia fina
Separação dos minerais pesados, análise óptica, montagem de seções polidas e imageamento CL	16 amostras	Bateia, líquidos densos, Frantz, lupa binocular e MEV JOEL 6510	Seções polidas com aproximadamente 200 grãos de zircão cada
Geocronologia U-Pb	8 amostras (866 zircões)	LA-ICP-MS (CETAC UV + Thermo-Fisher Element II)	Análises localizadas nas bordas dos grãos
Isótopos Lu-Hf	7 amostras (120 zircões)	LA-ICP-MS (Photon Machine ArF + Neptune)	Análises localizadas sob spots das análises U-Pb

Após realizado o levantamento bibliográfico sobre a área de interesse, tiveram início as atividades de campo, onde foram coletadas dezesseis amostras de sedimento arenoso (Fig. 9). Oito amostras se distribuem na zona de pós-praia (“backshore”) que abrange a região de Cassino e São José do Norte, no litoral médio do RS, sendo sete delas contidas na Barreira IV e uma na Barreira III, e as oito demais situadas em depósitos eólicos holocênicos em São José do Norte. A amostragem foi realizada utilizando um cano de PVC adaptado (Fig. 10), com 10 cm de diâmetro e uma marcação de 30 cm de altura, que conferiu amostras com volumes constantes de 2356 cm³. A amostra da Barreira III foi coletada através de raspagem numa parede sedimentar de aproximadamente 4m de altura (Fig. 10c), conferindo um volume amostral similar as demais amostras.

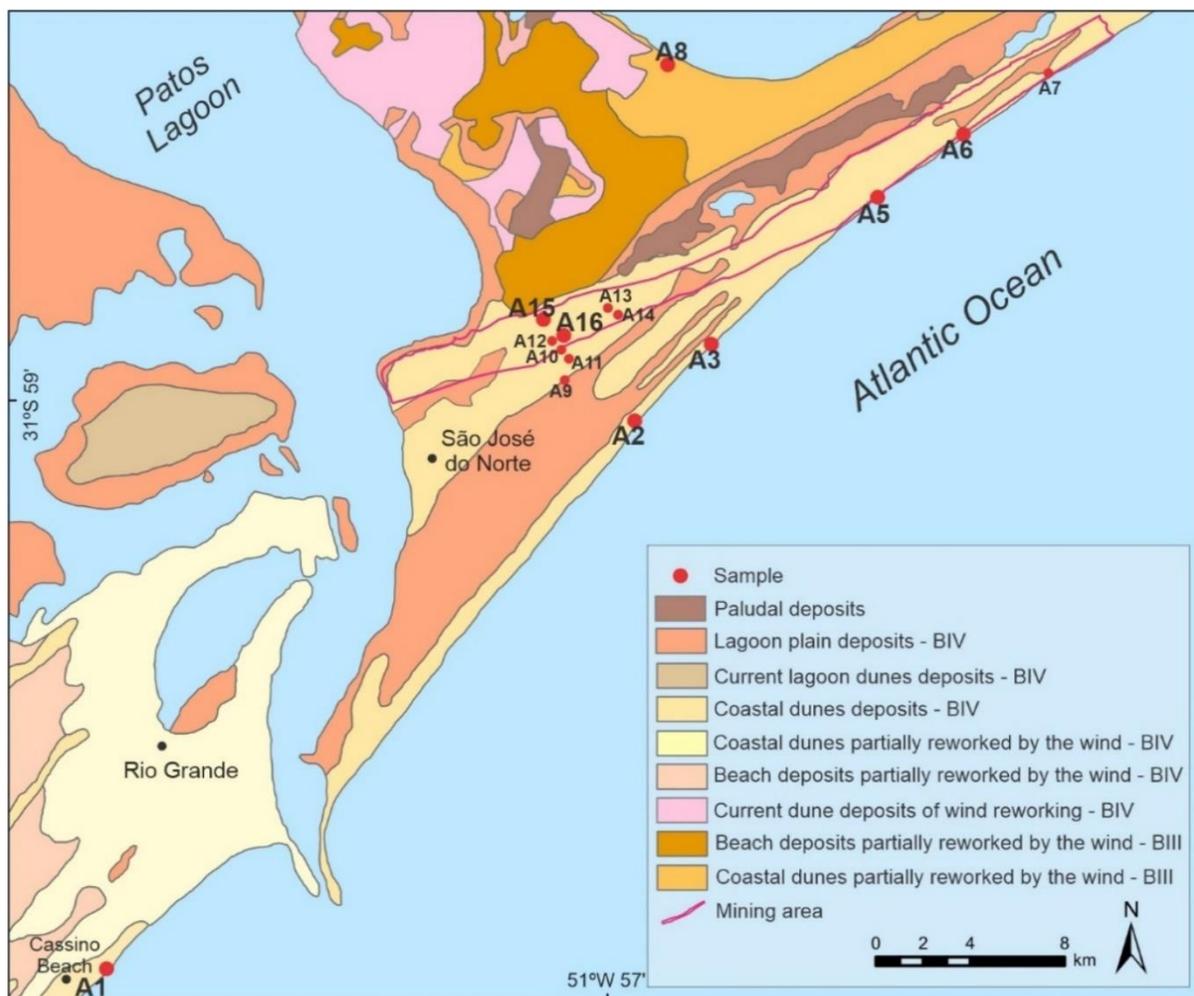


Figura 9. Localização das dezesseis amostras coletadas e geologia dos depósitos costeiros presentes na área de estudos. A maioria dos pontos amostrados se deu para a Barreira IV, com exceção da amostra 8, localizada na Barreira III. São destacadas na figura as amostras para as quais foram realizadas as análises isotópicas U-Pb-Hf, além da área de mineração segundo a empresa Rio Grande Mineração S.A. (RGM), detentora dos direitos minerários pela Agência Nacional de Mineração (ANM).



Figura 10. Metodologia de amostragem utilizada no trabalho. (A,B) Coletas de sedimento realizadas em face de praia, para a Barreira IV, representando as amostras A1 a A7; (C) Coleta realizada para sedimentos praias da Barreira III, equivalente a amostra A8; (D) Amostragem em estrada vicinal, sobre depósitos eólicos da Barreira IV, representando as amostras A9 a A16.

Os minerais pesados e leves foram separados por metodologia tradicional, através de bateia, bromofórmio ($\rho = 2,89 \text{ g/cm}^3$ a 25°C) e, posteriormente, pelo separador isodinâmico Frantz®. As frações magnéticas e não-magnéticas dos minerais pesados das dezesseis amostras foram separadas em diferentes intervalos de susceptibilidade magnética, utilizando as amperagens 0,1 A, 0,3 A, 0,5 A e 0,75 A, sendo as partículas ferromagnéticas separadas previamente ao uso do

equipamento por um imã de mão. A partir das frações obtidas, foi realizada a identificação óptica, por uma lupa binocular, das assembleias minerais e suas características petrográficas (Fig. 11). Essa etapa de separação magnética dos minerais e identificação óptica foi realizada no Laboratório de Sedimentologia da CPRM, na Superintendência de Porto Alegre (RS).

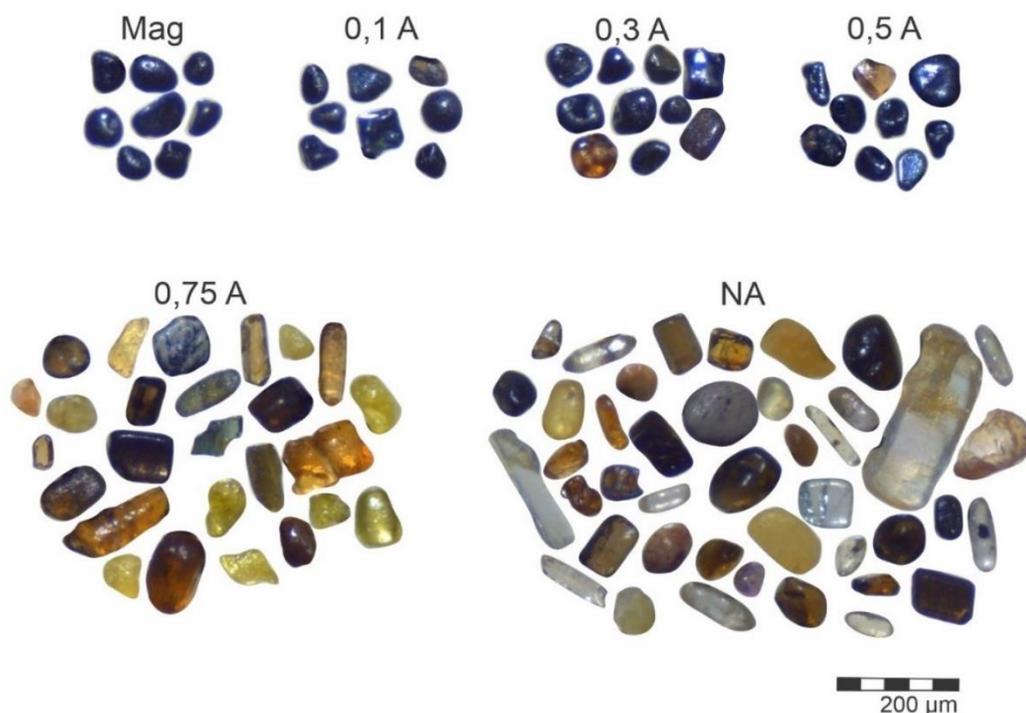


Figura 11. Frações resultantes da separação de minerais pesados por susceptibilidade magnética através do Frantz. De um modo geral, todas as amostras apresentaram a mesma composição mineralógica, diferindo apenas nos teores de cada grupo mineral: para as frações magnética (Mag) verificou-se a ocorrência de magnetita e \pm hematita; para 0,1 A, titano-magnetita e \pm hematita; para 0,3 A, ilmenita, granada, turmalina, \pm epidoto e \pm anfibólio; para a fração 0,5 a mineralogia é idêntica a fração 0,3 A, com acréscimos de \pm hematita; para 0,75 A, são verificados epidoto, estaurolita, turmalina e \pm anfibólio; e para a fração de minerais não atraídos (NA) a maior diversidade entre as frações, sendo composta de zircão, rutilo, cianita, turmalina, epidoto, \pm monazita e \pm fragmentos líticos. Apatita foi raramente identificada, enquanto leucoxênio foi verificado em várias frações, apesar da pouca concentração.

Dentre os minerais não magnéticos, aproximadamente 200 grãos de zircão de cada amostra foram selecionados manualmente e montados em seções circulares de epóxi de 2,5 cm, que foram polidas até revelar o núcleo dos grãos. As seções foram imageadas por um microscópio eletrônico de varredura (MEV) JOEL 6510, por catodoluminescência (CL). Por fim, análises geocronológicas dos isótopos U-Pb e Lu-Hf foram realizadas via LA-ICP-MS, no Laboratório de Geologia Isotópica da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP). Oito amostras foram selecionadas para

as análises de U-Pb (866 grãos de zircão) e sete para as análises de Lu-Hf (120 grãos de zircão).

Os dados de U-Pb foram obtidos através de um *Laser Ablation* CETAC UV Nd: YAG com $\lambda = 213$ nm, com uma célula de ablação Helix acoplada a um *High Resolution Sector Field Thermo-Fisher Element II* (HR-SF-ICP-MS). Os dados foram adquiridos em modo *peak jumping* em uma taxa de repetição de 10 Hz, com *spot size* de 20 μm de diâmetro e 5 a 10 μm de profundidade. Os *spots* foram alocados nas bordas dos cristais de zircão, de modo a registrar os últimos eventos tectônicos. A aquisição de dados consistiu em 20 s de *background*, seguido de 20 s de ablação da amostra + *background*. A rotina analítica consistiu em um conjunto composto por 20 pontos divididos em: duas análises em padrão primário (BB-1), quatro em dois padrões secundários distintos (GJ-1 e Plešovice) e 14 em grãos da amostra. Os dados brutos foram corrigidos com uso do software GLITTER® (Van Achterbergh *et al.*, 2001) usando o padrão GJ-1 (Morel *et al.*, 2008), através da subtração do sinal de *background*. A correção de Pb comum foi baseada na composição medida de ^{204}Pb (da amostra), conforme o modelo de Stacey e Kramers (1975). A constante de decaimento utilizada foi a de Jaffey *et al.* (1971). Os dados obtidos tiveram a propagação de incerteza de acordo com Horstwood *et al.* (2016). Para avaliar a precisão e acuracidade dos resultados os seguintes padrões foram analisados: Plešovice (337 ± 3.8 Ma; Sláma *et al.*, 2008) e BB-1 ($562,58 \pm 0,26$ Ma; Santos *et al.*, 2017). As idades obtidas foram concordantes com os erros experimentais: $562,69 \pm 2,31$ Ma (2s, n = 41) para BB-1 e $338,69 \pm 0,95$ Ma (2s, n = 96) para Plešovice. As idades utilizadas foram: $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ para grãos com menos de 1 Ga, e $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ para grãos com mais de 1 Ga. Idades com concordância diferente de 90 - 110% foram descartadas. Os grãos com idade $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ inferior a 300 Ma e concordância inferior a 90% foram utilizados, devido a razão $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ não poder ser medida com precisão e acuracidade suficientes via LA-ICP-MS. Para o cálculo da idade dos padrões e plotagem dos dados de zircão detriticos foi utilizado o IsoplotR (Vermeesch, 2018).

As medições isotópicas de Lu-Hf foram realizadas após a datação de U-Pb. Para medir as assinaturas isotópicas de Lu, Yb e Hf dos zircões utilizou-se um sistema de ablação a laser *Photon-Machines* (ArF excimer laser 193 nm), acoplado a um *Thermo-Fisher Neptune* + MC-ICP-MS. Os padrões de zircão utilizados durante as análises de Hf foram Temora (Black *et al.*, 2003), BB (Santos *et al.*, 2017), Mud Tank (Woodhead & Hergt, 2005), GJ-1 (Morel *et al.*, 2008) e Plesovice

(Sláma *et al.*, 2008). Os valores aceitos para $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ dos padrões obtiveram erro concordante aos valores recomendados nas sessões: $0,282680 \pm 0,000031$ ($n = 10$) para Temora, $0,2816713 \pm 0,0000028$ ($n = 13$) para BB, $0,282507 \pm 0,0000042$ ($n = 13$) para Mud Tank, $0,2820000 \pm 0,0000005$ ($n = 13$) para GJ-1 e $0,282484 \pm 0,000008$ para Plešovice. Durante as análises, utilizou-se uma energia de aproximadamente 5 J/cm^2 para o laser, com taxa de repetição de 10 Hz e *spots* de $40 \mu\text{m}$. Para melhorar a sensibilidade, N ($\sim 0,080 \text{ L / min}$) foi misturado com gás Ar e He (+ amostra) em um misturador de gás (Squid) antes de entrar no feixe. Os isótopos ^{175}Lu , ^{171}Yb e ^{173}Yb foram monitorados durante a análise e suas abundâncias relativas foram usadas para calcular interferências de ^{176}Lu e ^{176}Yb , que foram subtraídas de ^{176}Hf . Os dados foram corrigidos em uma planilha do Excel offline, usando $^{179}\text{Hf}/^{177}\text{Hf} = 0,7325$ (Patchett *et al.*, 1981), $^{176}\text{Lu}/^{175}\text{Lu} = 0,2658$ (valor interno do JWG) e $^{176}\text{Yb}/^{173}\text{Yb} = 0,796218$ (Chu *et al.*, 2002) (ver Gerdes & Zeh, 2006). As razões iniciais de $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ foram calculadas utilizando uma constante de decaimento de ^{176}Lu de $\lambda = 0,01867 \text{ Ga}^{-1}$ (Söderlund *et al.*, 2004). Os *spots* das análises de Lu-Hf foram realizados sobre os *spots* das análises de laser de U-Pb nos mesmos domínios de zircão. Os pontos escolhidos para as análises de Lu-Hf foram em grãos que apresentaram as idades mais representativas nas análises de U-Pb, principalmente grãos jovens, com o objetivo de verificar a concordância com os ciclos tectônicos previamente definidos.

1.6 Síntese dos resultados e discussão integradora

As amostras que contemplam a área de estudo apresentam idades entre $0,56 \pm 0,64 \text{ Ma}$ e $3694 \pm 54,3 \text{ Ma}$, conforme mostram os dados da Tabela Suplementar S1 do artigo (Anexo 1). O alto valor de desvio padrão, em relação ao valor da idade, deve-se à aplicação do método em grãos de zircão muito jovens. De acordo com esses resultados, sintetizados na figura 12, as maiores contribuições provêm dos orógenos Andino e Brasileiro. A distribuição do padrão de idade U-Pb dos 866 zircões analisados mostrou que 35,3% dos grãos pertencem ao Neoproterozóico, que abrange o ciclo Brasileiro, enquanto 9,1% do total de zircões analisados corresponde a grãos com menos de 50 Ma , restritos ao intervalo andino no sul da América do Sul. Entre esses grãos jovens, cerca de 85% têm idade inferior a 20 Ma . Não obstante, a assinatura Hf dos zircões se destaca pela distinção de cinco grupos, interpretados como provenientes dos orógenos Andino, Gondwanides, Famatiniano,

Brasiliano e Grenvilliano, confirmando uma impressão digital andina para as rochas fonte. Assim, em uma costa de margem passiva separada do Gondwana, onde esperava-se sedimentos cratônicos, há uma significativa ocorrência de sedimentos da margem ativa andina. A origem andina nos depósitos de minerais pesados é uma informação significativa e relevante para a contribuição de sedimentos distais do sistema do rio de La Plata, uma vez que seus afluentes também transportam material das montanhas andinas. Nesse contexto, o sistema de drenagens do rio de La Plata passa a ser o grande fornecedor de sedimentos, enquanto os sistemas de drenagem proximal contribuem principalmente para a erosão e transporte dos sedimentos do Escudo Sul-Rio-Grandense, alimentando não só o *placer* estudado, mas boa parte da costa sul brasileira.

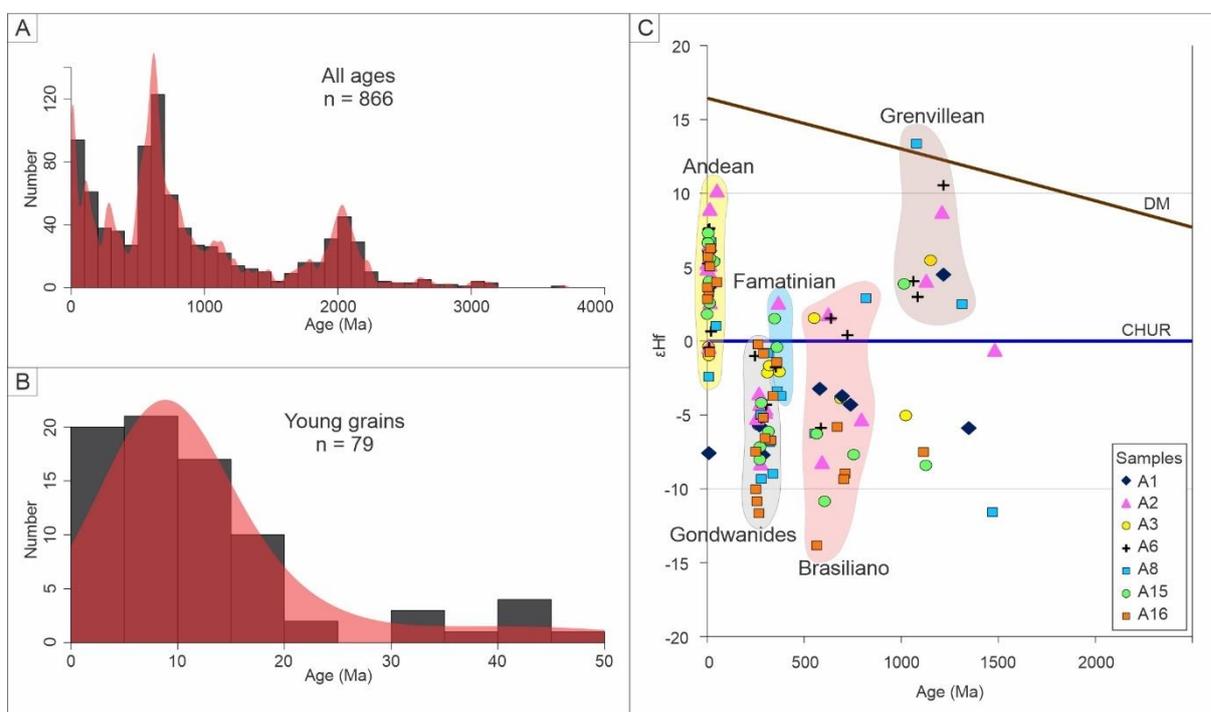


Figura 12. Síntese dos resultados. Diagramas de densidade probabilidade das idades U-Pb para todos os zircões analisados (A), no qual se destacam os picos com idade dos ciclos Brasiliano e Andino; e para a fração de grãos jovens, com < 50 Ma (B), onde a maioria dos grãos possuem idade inferior a 20 Ma. (C) Diagrama ϵ_{Hf} versus idades U-Pb dos zircões analisados e os ciclos orogênicos identificados: Andino, Famatiniano, Gondwanides, Brasiliano e Grenvilliano.

Ademais, para avançar no entendimento acerca de estudos de proveniência de margens passivas, foi realizada uma comparação com outros depósitos similares localizados na Austrália (Reid *et al.*, 2013), leste africano (Elias, 2016) e Golfo do México (Tapia-Fernandez *et al.*, 2017), através da análise da distribuição dos sedimentos para configurações de bacias convergentes, colisionais e extensionais.

O modelo, baseado em Cawood *et al.* (2012), torna possível a predição da configuração tectônica de pacotes sedimentares de origem desconhecida. No entanto, a previsão tectônica irá depender da presença de um orógeno ativo ou inativo no continente a ser alcançado por rios de abastecimento nos três campos (extensional, colisional e convergente). No caso da PCRS, o orógeno ativo dos Andes, presente na margem continental oposta, é capaz de influenciar a deposição na margem passiva por meio de um extenso sistema de drenagem. Assim, uma orogênese ativa no continente fornece uma fonte sedimentar para que esses depósitos de margem passiva apresentem grãos com idades de cristalização jovens. Ainda, a comparação realizada entre os depósitos reafirmou a importância das correntes costeiras no transporte de grãos, seja para fontes distais como as do *placer* de São José do Norte, ou para fontes mais proximais, como é o caso dos outros depósitos usados na comparação realizada.

1.7 Considerações finais

A variedade e distribuição de minerais pesados na área de estudo e a predominância de sedimentos muito finos e altamente maduros apontam para áreas fontes múltiplas na PCRS. Na delimitação da proveniência do *placer* Holocênico de São José do Norte, a assinatura isotópica U-Pb-Hf tornou possível a distinção de diferentes terrenos geológicos com idades semelhantes, mas diferentes assinaturas isotópicas de Hf. Os resultados destacam números significativos e surpreendentes de zircões jovens, com menos de 50 Ma, enquanto a assinatura Hf distingue zircões dos ciclos Andino, Gondwanides, Famatiniano, Brasileiro e Grenvilliano. Dessa forma, as idades U-Pb do zircão detrítico obtidas para amostras da Barreira III e IV e os dados de Hf fornecem um forte argumento para a principal contribuição provinda do sistema de drenagens do Rio de La Plata, alimentando a deriva litorânea para o norte em períodos de mar baixo. Assim, a importância das correntes costeiras no transporte de grãos é mais uma vez reafirmada, sendo nesse estudo de extrema importância para a contribuição de fontes distais na construção do depósito de Ti.

Os resultados confirmaram as hipóteses de trabalho, considerando a importância da deriva litorânea, da grande influência de fontes distais e, portanto, da grande quantidade de grãos jovens presentes na área de estudo, que localizada na porção média-sul da PCRS também está mais próxima da foz do principal sistema

de drenagem que carregava esses sedimentos, principalmente se comparado a Chemale Jr. *et al.* (2021), que realizou suas análises em uma área 200 km a norte.

Nossos resultados através da assinatura isotópica de zircão U-Pb-Hf apoiam e mais do que indicam uma grande influência do Rio de La Plata como fonte de areia para a PCRS durante o Quaternário. A assinatura do zircão nas areias do sul do Brasil confirma a impressão digital de uma margem ativa em uma margem passiva, e pode ser usada como uma assinatura em estudos de transporte de sedimentos no Cenozóico e em bacias mais antigas. Além disso, as informações apresentadas fornecem um critério para identificar orogêneses ativas ou inativas nos continentes, podendo ser aplicado no estudo de margens passivas do passado geológico.

Referências Bibliográficas

- Addad, J.E. 2001. *Minerais pesados: uma ferramenta para prospecção, proveniência, paleogeografia e análise ambiental*. Imprensa Universitária, UFMG, 68p.
- Ayup-Zouain, R.N., Corrêa, I.C.S., Tomazelli, L.J. & Dillenburg, S.R. 2001. Dispersão e proveniência dos minerais pesados nos sedimentos de fundo da Plataforma Continental Sul-Brasileira, Uruguia e Norte-Argentina. *In: CONGRESSO DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ESTUDOS DO QUATERNÁRIO, VIII., 2001, Imbé, Anais... Imbé, ABEQUA, p.126-127.*
- Ayup-Zouain, R.N., Corrêa, I.C.S., Tomazelli, L.J. & Dillenburg, S.R. 2002. Área fonte e dispersão dos minerais pesados nos sedimentos superficiais da plataforma continental norte do Atlântico Sul Ocidental. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, XLI., 2002, João Pessoa. Anais... João Pessoa, SBG, p. 121.*
- Barboza, E.G. & Rosa, M.L.C.C. 2014. Indicadores geológicos e geomorfológicos de setores em erosão na costa do rio grande do sul. *In: Goso, C. Nuevas miradas a la problemática de los ambientes costeros*. Montevideo, DIRAC, p. 83-98.
- Barboza, E.G., Rosa, M.L.C.C., Hesp, P.A., Dillenburg, S.R., Tomazelli, L.J. & Ayup-Zouain, R.N. 2011. Evolution of the Holocene coastal barrier of Pelotas Basin (Southern Brazil) - A new approach with GPR data. *Journal of Coastal Research*, p. 646-650.
- Barletta, R.C. & Calliari, L.J. 2003. An assessment of the atmospheric and wave aspects determining beach morphodynamic characteristics along the central

- coast of RS state, southern Brazil. *Journal of Coastal Research*, p. 300-308.
- Barros, C.E., Nardi, L.V.S., Dillenburg, S.R., Ayup-Zouain, R.N., Jarvis, K. & Baitelli, R. 2010. Detrital minerals of modern beach sediments in Southern Brazil: A provenance study based on the chemistry of zircon. *Journal of Coastal Research*, 26(1): 80-93.
- Black, L.P., Kamo, S.L., Allen, C.M., Aleinikoff, J.N., Davis, D.W., Korsch, R.J. & Foudoulis, C. 2003. TEMORA 1: A new zircon standard for Phanerozoic U-Pb geochronology. *Chemical Geology*, 200(1-2): 155-170.
- Boudin, A. & Deutsch, S. 1970. Geochronology: Recent Development in the Lutetium-176/Hafnium-176 Dating Method. *Science*, 168: 1219-1220.
- Buchmann, F.S.C. & Tomazelli, L.J. 2003. Relict nearshore shoals of Rio Grande do Sul, southern Brazil: origin & effects on nearby modern beaches. *Journal of Coastal Research*, 35: 318–322.
- Bueno, G.V., Zacharias, A.A., Oreiro, S.G., Cupertino, J.A., Falkenheim, F.U.H. & Martins Neto, M.A. 2007. Bacia de Pelotas: *Boletim de Geociências da Petrobrás*, 15(2): 551-559.
- Carassai, J.J., Lavina, E.L.C., Chemale Jr., F. & Girelli, T.J. 2019. Provenance of heavy minerals for the Quaternary coastal plain of southernmost Brazil (Rio Grande do sul State). *Journal of Coastal Research*, 35(2): 295-304.
- Cawood, P.A., Hawkesworth, C.J. & Dhuime, B. 2012. Detrital zircon record and tectonic setting. *Geology*, 40(10): 875-878.
- Chemale Jr., F., Lavina, E.L.C., Carassai, J.J., Girelli, T.J. & Lana, C. 2021. Andean orogenic signature in the Quaternary sandy barriers of Southernmost Brazilian Passive Margin – Paradigm as a source area. *Geoscience Frontiers*, 12(4): 101119.
- Chemale Jr., F., Kawashita, K., Dussin, I.A., Ávila, J.N., Justino, D. & Bertotti, A. 2012. U-Pb zircon in situ dating with LA-MC-ICP-MS using a mixed detector configuration. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 84: 275-295.
- Chu, N.C., Taylor, R.N., Chavagnac, V., Nesbitt, R.W., Boella, R.M., Milton, J.A., German, C.R., Bayon, G. & Burton, K. 2002. Hf isotope ratio analysis using multi-collector inductively coupled plasma mass spectrometry: An evaluation of isobaric interference corrections. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 17(12): 1567-1574.

- Corfu, F., Hancher, J.M., Hoskin, P.W.O. & Kinny, P. 2003. Atlas of zircon textures. *In: Hancher, J.M. & Hoskin P.W.O. (Ed.). Zircon, Reviews in mineralogy and geochemistry*. Mineralogical Society of America, v. 53, p. 469-500.
- Corrêa, I.C.S., Ayup-Zouain, R.N., Tomazelli, L.J. & Toldo Jr., E.E. 2001. Distribuição dos minerais pesados nos sedimentos de fundo da Plataforma Continental Sul-Brasileira, Uruguia e Norte-Argentina. *In: CONGRESSO DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ESTUDOS DO QUATERNÁRIO, VIII., 2001, Imbé, Anais... Imbé, ABEQUA, p. 124.*
- Côrrea, I.C.S., Ayup-Zouain, R.N., Weschenfelder, J. & Tomazelli, L.J. 2008. Áreas Fontes dos Minerais Pesados e sua Distribuição sobre a Plataforma Continental Sul-brasileira, Uruguia e Norte-argentina. *Pesquisas em Geociências, 35(1): 137-150.*
- Cottle, J.M., Horstwood, M.S.A. & Parrish, R.R. 2009. A new approach to single shot laser ablation analysis and its application to in situ Pb/U geochronology. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry, 24(10): 1355-1363.*
- Dillenburg, S.R. 1990. Atributos Petrográficos e Proveniência dos Sedimentos Superficiais da Plataforma Continental Externa do Rio Grande do Sul. Trecho Rio Grande–Chuí. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, XXXVI., 1990, Natal. Anais... Natal, SBG, v.2, p. 580-587.*
- Dillenburg, S.R., Barboza, E.G., Rosa, M.L.C.C., Caron, F., Cancelli, R., Santos-Fischer, C.B., Lopes, R.P. & Ritter, M.N. 2020. Sedimentary records of Marine Isotopic Stage 3 (MIS 3) in southern Brazil. *Geo-Marine Letters, 40: 1099-1108.*
- Dillenburg, S.R., Barboza, E.G., Tomazelli, L.J., Hesp, P.A., Clerot, L.C.P. & Ayup-Zouain, R.N. 2009. The holocene coastal barriers of Rio Grande do Sul. *In: Dillenburg, S.R. & Hesp, P.A. (Ed.). Geology and Geomorphology of Holocene Coastal Barriers of Brazil. Lecture Notes in Earth Sciences. Berlin, Heidelberg, Springer, v. 107, p. 53-91.*
- Dillenburg, S.R. & Barboza, E.G. 2014 The strike-fed sandy coast of Southern Brazil. *In: Martini, I.P. & Wanless, H.R. (Ed.). Sedimentary Coastal Zones from High to Low Latitudes: Similarities and Differences. London, Geological Society, v. 388, p. 333-352.*
- Dillenburg, S.R., Roy, P.S., Cowell, P.J. & Tomazelli, L.J. 2000. Influence of antecedent topography on coastal evolution as tested by the shoreface

- translation-barrier model (STM). *Journal of Coastal Research*, 16: 71-81.
- Dillenburg, S.R., Tomazelli, L.J. & Barboza, E.G. 2004. Barrier evolution and placer formation at Bujuru southern Brazil. *Marine Geology*, 203(1-2): 43-56.
- Dillenburg, S.R., Tomazelli, L.J., Hesp, P.A., Barboza, E.G., Clerot, L.C.P. & Silva, D.B. 2006. Stratigraphy and evolution of a prograded transgressive dunefield barrier in southern Brazil. *Journal of Coastal Research*, 39: 132-135.
- Dominguez, J.M.L. 2009. The coastal zone of Brazil. In: Dillenburg, S.R. & Hesp, P.A. (Orgs.). *Geology and Geomorphology of Holocene Coastal Barriers of Brazil*. Lecture Notes in Earth Sciences. Berlin, Heidelberg, Springer, v. 107, p. 17-51.
- Elias, S.J. 2016. *Mineralogy and provenance of the TiO₂ - ilmenite heavy mineral sand deposit of Nataka*. Cape Town, 123p. Dissertação de Mestrado, University of Cape Town.
- Fairchild, T.R., Teixeira, W. & Babinski, M. 2009. Geologia e a descoberta da magnitude do tempo. In: Teixeira, W., Fairchild, T.R., Toledo, M.C.M. & Taioli, F. (Orgs.). *Decifrando a Terra*. São Paulo, Companhia Nacional, p. 280-305.
- Frei, D. & Gerdes, A. 2009. Precise and accurate in situ U-Pb dating of zircon with high sample throughput by automated LA-SF-ICP-MS. *Chemical Geology*, 261(3-4): 261-270.
- Gerdes, A. & Zeh, A. 2006. Combined U-Pb and Hf isotope LA-(MC-)ICP-MS analyses of detrital zircons: comparison with SHRIMP and new constraints for the provenance and age of an Armorican metasediment in Central Germany. *Earth and Planetary Science Letters*, 249(1-2): 47-61.
- Harley, S.L. & Kelly, N.M. 2007. Zircon tiny but timely. *Elements*, 3(1): 13–18.
- Harley, S.L., Kelly, N.M. & Möller, A. 2007. Zircon behaviour and the thermal histories of mountain chains. *Elements*, 3(1): 25-30.
- Horstwood, M.S.A., Košler, J., Gehrels, G., Jackson, S.E., McLean, N.M., Paton, C., Pearson, N.J., Sircombe, K., Sylvester, P., Vermeesch, P., Bowring, J.F., Condon, D.J. & Schoene, B. 2016. Community-Derived Standards for LA-ICP-MS U-(Th-)Pb Geochronology – Uncertainty Propagation, Age Interpretation and Data Reporting. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 40(3): 311-332.
- Hoskin, P.W.O. & Schaltegger, U. 2003. The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*. 53(1):

27–62.

- Iizuka, T., Yamaguchi, T., Itano, K., Hibiya, Y. & Suzuki, K. 2017. What Hf isotopes in zircon tell us about crust–mantle evolution. *Lithos*, 274: 304-327.
- Imbrie, J., Hays, J.D., Martinson, D.G., McIntyre, A., Mix, A.C., Morley, J.J., Pisias, N.G., Prell and, W.L. & Shackleton, N.J. 1984. The orbital theory of pleistocene climate: support from a revised chronology of the marine δO^{18} record. *In*: Berger, A.L. (Ed.). *Milankovitch and Climate*. Riedel, p. 269-305.
- Jackson, S.E., Pearson, N.J., Griffin, W.L. & Belousova, E.A. 2004. The application of laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry to in situ U-Pb zircon geochronology. *Chemical Geology*, 211(1-2): 47-69.
- Jaffey, A.H., Flynn, K.F., Glendenin, L.E., Bentley, W.C. & Essling, A.M. 1971. Precision measurement of half-lives and specific activities of U^{235} and U^{238} . *Physical Review C*, 4(5): 1889-1906.
- Komar, P.D. & Wang, C. 1984. Processes of selective grain transport and the formation of placers on beaches. *Journal of Geology*, 92(6): 637-655.
- Kowsmann, R.O. & Costa, M.P.A. 1979. *Sedimentação Quaternária da Margem Continental Brasileira e das áreas oceânicas adjacentes*. Rio de Janeiro, Série Projeto REMAC, 8: 55p.
- Lee, J.K.W., Williams, I.S. & Ellis, D.J. 1997. Pb, U and Th diffusion in natural zircon. *Nature*, 390: 159-162.
- Lima S.F., Almeida L.E. & Toldo Jr., E. 2002. Estimativa da capacidade do transporte longitudinal de sedimentos a partir de dados de ondas para a costa do Rio Grande do Sul. *Pesquisas em Geociências*, 28(2): 99-107.
- Lopes, R.P., Kinoshita, A., Baffa, O., Figueiredo, A.M.G., Dillenburg, S.R., Schultz, C.L. & Pereira, J.C. 2014. ESR dating of Pleistocene mammals and marine shells from the coastal plain of Rio Grande do Sul state, southern Brazil. *Quaternary International*, 352: 124-134.
- Lopes, R.P., Oliveira, L.C., Figueiredo, A.M.G., Kinoshita, A., Baffa, O. & Buchmann, F.S. 2010. ESR dating of Pleistocene mammal teeth and its implications for the biostratigraphy and geological evolution. *Quaternary International*, 212(2): 213-222.
- Lorscheitter, M.L. & Romero, E.J. 1985. Palynology of Quaternary sediments of the core T15, Rio Grande Cone, South Atlantic, Brazil. *Quaternary of South America*

- and Antarctic Peninsula*, 3(1): 55-92.
- Loss, E. & Dehnhardt, E.A. 1983. Concentração de areias negras ao longo da Mineralógica. *Acta Geológica Leopoldensia*, 7(14): 93-130.
- McNair, A. 1961. The half-life of long-lived lutetium-176. *Philosophical Magazine*, 6(67): 851-856.
- Milliman, J.D. 1975. A Synthesis. In: Milliman, J.D. & Summerhayes, C.P. (Orgs.). *Upper Continental Margin Sedimentation off Brazil*. Stuttgart, Schweizerbart Science Publishers, p. 75-151.
- Morel, M.L.A., Nebel, O., Nebel-Jacobsen, Y.J., Miller, J.S. & Vroon, P.Z. 2008. Hafnium isotope characterization of the GJ-1 zircon reference material by solution and laser-ablation MC-ICPMS. *Chemical Geology*, 255(1-2): 231-235.
- Morton, A.C. 1985. Heavy Minerals in Provenance Studies. In: Zuffa, G.G. (Ed.). *Provenance of arenites*. Dordrecht, D. Rei del publishing Company, p. 249-277.
- Morton, A.C., Claoué-Long, J.C. & Berge, C. 1996. SHRIMP constraints on sediment provenance and transport history in the Mesozoic Staffjord Formation, North Sea. *Journal of the Geological Society*, 153(3): 915-929.
- Motta, L.M., Toldo Jr., E.E., de Almeida, L.E. de S.B. & Nunes, J.C. 2015. Sandy sediment budget of the midcoast of Rio Grande do Sul, Brazil. *Journal of Marine Research*, 73(3-4): 49-69.
- Munaro, P. 1991. *Relatório de avaliação das reservas geológicas de minerais pesados*. São Paulo, Paranapanema Minerações, 12p.
- Munaro, P. 1994. *Geologia e mineralogia do depósito de minerais pesados de Bojuru, RS*. Porto Alegre, 96p. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Palma, J.C. 1979. *Recursos Minerais da Margem Continental Brasileira e das Áreas Oceânicas Adjacentes: Depósitos de Minerais Pesados*. Rio de Janeiro, Série Projeto REMAC., p. 33-50.
- Parise, C.K., Calliari, L.J. & Krusche, N. 2009. Extreme storm surges in the south of Brazil: Atmospheric conditions and shore erosion. *Brazilian Journal of Oceanography*, 57: 175-188.
- Patchett, P.J. & Tatsumoto, M. 1980a. A routine high-precision method for Lu-Hf isotope geochemistry and chronology. *Contributions to Mineralogy and*

- Petrology*, 75(3): 263-267.
- Patchett, P.J. & Tatsumoto, M. 1980b. Hafnium isotope variations in oceanic basalts. *Geophysical Research Letters*, 7(12): 1077-1080.
- Patchett, P.J. & Tatsumoto, M. 1980c. Lu–Hf total-rock isochron for the eucrite meteorites. *Nature*, 288(5791): 571–574.
- Patchett, P.J., Kouvo, O., Hedge, C.E. & Tatsumoto, M. 1981. Evolution of continental crust and mantle heterogeneity: Evidence from Hf isotopes. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 78(3): 279–297.
- Pomerancblum, M. & Costa, M.P.A. 1972. Integração de Informações sobre Minerais Pesados da Plataforma Continental Brasileira. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, XXVII., 1972, Belém. *Anais...* Belém, SBG, p. 179–186.
- Poupeau, G., Soliani Jr, E., Rivera, A., Loss, E. & Vasconcellos, M. 1988. Datação por termoluminescência de alguns depósitos arenosos costeiros do último ciclo climático, no Nordeste do Rio Grande do Sul. *Pesquisas em Geociências*, 21(21): 25-47.
- Pupin, J.P. 1980. Zircon and granite petrology. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 73(3): 207–220.
- Reid, A.J., Keeling, J.L. & Belousova, E.A. 2013. Hf isotopic investigation into the provenance of zircons in heavy mineral sands of the Eucla Basin. *Mines and Energy South Australia Journal*, 68: 17–24.
- Rocha, J.M., Milliman, J.D., Santana, C.I. & Vicalvi, M.A. 1975. Southern Brazil. In: Milliman, J.D. & Summerhayes, C.P. (Orgs.). *Upper Continental Margin Sedimentation off Brazil*. Stuttgart, Schweizerbart Science Publishers, p. 50–117.
- Rosa, M.L.C.C., Barboza, E.G., Abreu, V.S., Tomazelli, L.J. & Dillenburg, S.R. 2017. High-Frequency Sequences in the Quaternary of Pelotas Basin (coastal plain): A record of degradational stacking as a function of longer-Term base-level fall. *Brazilian Journal of Geology*, 47: 183–207.
- Rosa, M.L.C.C. 2012. *Geomorfologia, estratigrafia de sequências e potencial de preservação dos Sistemas Laguna-Barreira do Quaternário costeiro do Rio Grande do Sul*. Porto Alegre, 251p. Tese de Doutorado, Programa de Pós-graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

- Rosa, M.L.C.C., Barboza, E.G., Dillenburg, S.R., Tomazelli, L.J. & Ayup-Zouain, R.N. 2011. The Rio Grande do sul (southern Brazil) shoreline behavior during the Quaternary: a cyclostratigraphic analysis. *Journal of Coastal Research*, 686–690.
- Santana, C.I. 1997. *Recursos minerais da margem continental brasileira e bacias oceânicas adjacentes*. Comissão Interministerial para Recursos do Mar (CIRM), Grupo de Trabalho sobre Recursos não vivos da Plataforma Continental, Relatório Inédito, p. 20-23.
- Santos, M.M., Lana, C., Scholz, R., Buick, I., Schmitz, M.D., Kamo, S.L., Gerdes, A., Corfu, F., Tapster, S., Lancaster, P., Storey, C.D., Basei, M.A.S., Tohver, E., Alkmim, A., Nalini, H., Krambrock, K., Fantini, C. & Wiedenbeck, M. 2017. A New Appraisal of Sri Lankan BB Zircon as a Reference Material for LA-ICP-MS U-Pb Geochronology and Lu-Hf Isotope Tracing. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 41(3): 335-358.
- Schaltegger, U., Schmitt, A.K. & Horstwood, M.S.A. 2015. U-Th-Pb zircon geochronology by ID-TIMS, SIMS, and laser ablation ICP-MS: Recipes, interpretations, and opportunities. *Chemical Geology*, 402: 89-110.
- Schmitt, A.K., Chamberlain, K.R., Swapp, S.M. & Harrison, T.M. 2010. In situ U-Pb dating of micro-baddeleyite by secondary ion mass spectrometry. *Chemical Geology*, 269: 386-395.
- Shackleton, N.J. & Opdyke, N.D. 1973. Oxygen isotope and palaeomagnetic stratigraphy of Equatorial Pacific core V28-238: Oxygen isotope temperatures and ice volumes on a 105 year and 106 year scale. *Quaternary Research*, 3(1): 39-55.
- Silva, M.A.M. 1979. Provenance of heavy minerals in beach sands, southeastern Brazil: from Rio Grande to Chui (Rio Grande do Sul State). *Sedimentary Geology*, 24(1-2): 133-148.
- Sláma, J. Košler, J., Condon, D.J., Crowley, J.L., Gerdes, A., Hanchar, J.M., Horstwood, M.S.A., Morris, G.A., Nasdala, L., Norberg, N., Schaltegger, U., Schoene, B., Tubrett, M.N. & Whitehouse, M.J. 2008. Plešovice zircon - A new natural reference material for U-Pb and Hf isotopic microanalysis. *Chemical Geology*, 249(1-2): 1-35.
- Söderlund, U., Patchett, P.J., Vervoort, J.D. & Isachsen, C.E. 2004. The ^{176}Lu decay

- constant determined by Lu-Hf and U-Pb isotope systematics of Precambrian mafic intrusions. *Earth and Planetary Science Letters*, 219(3-4): 311-324.
- Stacey, J.S. & Kramers, J.D. 1975. Approximation of terrestrial lead isotope evolution by a two-stage model. *Earth and Planetary Science Letters*, 26(2): 207-221.
- Tapia-Fernandez, H.J., Armstrong-Altrin, J.S. & Selvaraj, K. 2017. Geochemistry and U-Pb geochronology of detrital zircons in the Brujas beach sands, Campeche, Southwestern Gulf of Mexico, Mexico. *Journal of South American Earth Sciences*, 76: 346-361.
- Toldo Jr., E.E., Nicolodi, J.L., Almeida, L.E.S.B., Corrêa, I.C.S. & Esteves, L.S. 2006. Coastal Dunes and Shoreface Width as a Function of Longshore Transport. *Journal of Coastal Research*, 390-394.
- Tomazelli, L.J. 1978. Minerais Pesados da Plataforma Continental do Rio Grande do Sul. *Acta Geológica Leopoldensia*, 2: 103-159.
- Tomazelli, L.J., Dillenburg, S.R. & Villwock, J.A. 2000. Late Quaternary Geological History of Rio Grande Do Sul Coastal Plain, Southern Brazil. *Revista Brasileira de Geociências*, 30(3): 474-476.
- Tomazelli, L.J., Dillenburg, S.R. & Villwock, J.A. 2006. Geological Evolution of Rio Grande do Sul Coastal Plain, Southern Brazil. *Journal of Coastal Research*, 275-278.
- Tomazelli, L.J. & Villwock, J.A. 1989. Processos erosivos na costa do Rio Grande do Sul, Brasil: evidências de uma provável tendência contemporânea de elevação do nível relativo do mar. *In: CONGRESSO DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ESTUDOS DO QUATERNÁRIO*, II., 1989, Rio de Janeiro. *Anais...* Rio de Janeiro, ABEQUA, p. 16.
- Tomazelli, L.J. & Villwock, J.A. 2005. Mapeamento Geológico de Planícies Costeiras: o Exemplo da Costa do Rio Grande do Sul. *Gravel*, 3: 109-115.
- Tomazelli, L.J., Villwock, J.A., Dillenburg, S.R., Bachi, F.A. & Dehnhardt, B.A. 1998. Significance of Present-Day Coastal Erosion and Marine Transgression, Rio Grande do Sul, Southern Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 70(2): 220-229.
- Urien, C.M. & Ewing, M. 1974. Recent Sediments and Environment of Southern Brazil, Uruguay, Buenos Aires, and Rio Negro Continental Shelf. *In: Burk, C.A. & Drake, C.L. (Ed.). The Geology of Continental Margins*. Berlin, Heidelberg,

- Springer, p. 157-177.
- Van Achterbergh, E., Ryan, C.G. & Griffin, W.L. 2001. Data reduction software for LA-ICP-MS. *In: Sylvester, P. (Ed.). Laser Ablation ICPMS in the Earth Science.* Mineralogical Association of Canada, v. 29, p. 239-243.
- Vermeesch, P. 2018. IsoplotR: A free and open toolbox for geochronology. *Geoscience Frontiers*, 9(5): 1479-1493.
- Vervoort, J.D. & Kemp, A.I.S. 2016. Clarifying the zircon Hf isotope record of crust-mantle evolution. *Chemical Geology*, 425: 65-75.
- Villwock, J.A. & Tomazelli, L.J. 1995. *Geologia Costeira do Rio Grande do Sul.* Porto Alegre, Notas Técnicas do CECO-IG-UFRGS, v. 8, p. 1-45.
- Villwock, J.A., Loss, E.L., Dehnhardt, E.A., Tomazelli, L.J. & Hofmeister, T. 1979. Concentraciones de Arenas Negras a lo largo de la costa do Rio Grande do Sul. *In: SEMINÁRIO SOBRE ECOLOGIA BENTÔNICA Y SEDIMENTACIÓN DE LA PLATAFORMA CONTINENTAL DEL ATLÁNTICO SUR*, 1979, Montevidéo. *Anais...* Montevidéo, ORCYT, p. 415-422.
- Villwock, J.A., Tomazelli, L.J., Loss, E.L., Dehnhardt, E.A., Horn Filho, N.O., Bachi, F.A. & Dehnhardt, B.A. 1986. Geology of the Rio Grande do Sul Coastal Province. *In: Rabassa, J. (Ed.). Quaternary of South America and Antarctic Peninsula.* London, CRC Press, v. 4, p. 79-97.
- Walder, A.J., Platzner, I. & Freedman, P.A. 1993. Isotope ratio measurement of lead, neodymium and neodymium-samarium mixtures, hafnium and hafnium-lutetium mixtures with a double focusing multiple collector inductively coupled plasma mass spectrometer. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 8(1): 19-23.
- Woodhead, J.D. & Hergt, J.M. 2005. A preliminary appraisal of seven natural zircon reference materials for in situ Hf isotope determination. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 29(2): 183-195.
- Wust, C.F. 2021. *Caracterização química da mineralização de ilmenita da região de São José do Norte, litoral do RS.* São Leopoldo, 54p. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geologia, Universidade do Vale do Rio dos Sinos.

2. ARTIGO

O artigo apresentado como corpo principal da presente Dissertação de Mestrado intitula-se “*Andean fingerprint on placer sands from the southern Brazilian coast*” e foi submetido à revista *Sedimentary Geology*.



Monique Rizzi <mmonique.rizzi@gmail.com>

Acknowledgement of receipt of your submitted article

1 mensagem

Sedimentary Geology <em@editorialmanager.com>

31 de agosto de 2021 03:02

Responder a: Sedimentary Geology <sedgeo-ee@elsevier.com>

Para: Monique Aparecida Marchese Rizzi <mmonique.rizzi@gmail.com>

Dear Mrs. Rizzi,

Your submission entitled "Andean fingerprint on placer sands from the southern Brazilian coast" has been received by Sedimentary Geology.

Your paper will be considered as belonging to the category Research Paper. Please contact us if this is not correct.

Please note that submission of an article is understood to imply that the article is original and is not being considered for publication elsewhere. Submission also implies that all authors have approved the paper for release and are in agreement with its content.

You will be able to check on the progress of your paper by logging on to <https://www.editorialmanager.com/sedgeo/> as Author.

Your manuscript will be given a reference number in due course.

Thank you for submitting your work to this journal.

Kind regards,

Editorial Manager
Sedimentary Geology

In compliance with data protection regulations, you may request that we remove your personal registration details at any time. (Use the following URL: <https://www.editorialmanager.com/sedgeo/login.asp?a=r>). Please contact the publication office if you have any questions.

Andean fingerprint on placer sands from the southern Brazilian coast

Monique Aparecida Marchese Rizzi^{a,*}, Sérgio Rebello Dillenburg^b, Lucy Takehara Chemale^c, Tiago Jonatan Girelli^d, Cássia Fatima Wust^d, Cristiano de Carvalho Lana^e, Farid Chemale Junior^d

^a *Programa de Pós-Graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brazil;*

^b *Centro de Estudos de Geologia Costeira e Oceânica, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brazil;*

^c *Serviço Geológico do Brasil – CPRM, Superintendência de Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brazil;*

^d *Programa de Pós-Graduação em Geologia, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, Rio Grande do Sul, Brazil;*

^e *Departamento de Geologia, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Minas Gerais, Brazil.*

*Corresponding author:

E-mail address: mmonique.rizzi@gmail.com (M. A. M. Rizzi)

Abstract

On the passive margin of southern Brazil, where the availability of sediments and coastal system conditions were adequate for the formation of a Ti-Zr-bearing placer in the Holocene, could there be a source of detrital contribution other than craton? To answer that, detrital zircon isotopes U-Pb and Lu-Hf using the LA-ICP-MS method were performed. The U-Pb age pattern distribution of 866 zircons showed that 35.3% of the grains belong to the Neoproterozoic, which covers the Brasiliano cycle. However, 9.1% of the total zircons analyzed (up to 12% in some samples) correspond to grains younger than 50 Ma, restricted to the Andean interval in southern South America. The Hf signature of the zircons stands out by pointing to five significant and distinct groups interpreted as coming from the Andean, Gondwanides, Famatinian, Brasiliano, and Grenvillean orogens, confirming an Andean fingerprint as source rocks in addition to the sediments originating from the craton. This Andean source is related to the distal sediment contribution of the La

Plata River system, which is the largest supplier of sediments, feeding the placer and also the entire southern Brazilian coast.

Keywords: Detrital zircons, U-Pb and Lu-Hf isotopes, Placer deposits, Andean provenance, Rio Grande do Sul Coastal Plain, Brazilian coast

2.1 Introduction

Formed by the mechanical concentration of heavy minerals in a sedimentary environment, placers can constitute deposits of great added economic value in a wide range of elements and minerals. Ti-Zr placers, for example, occur on the east and west coasts of Australia, southeast and west Africa, India and Sri Lanka, Brazil, and the southeastern United States (Hamilton, 1995; Stanaway, 2005). The composition of detrital sediments and the formation of these deposits are controlled by several factors, such as transportation, climate, tectonics, and others, which also act in the composition of passive and active coastal environments (Verma and Armstrong-Altrin, 2016). In addition to containing economically important minerals, these deposits include groups of minerals used essentially in provenance studies. One mineral is zircon, which in addition to being highly refractory and ubiquitous in all sedimentary environments, also provides significant information regarding the properties of magmas, becoming a potential indicator of provenance because its chemistry is sufficiently variable in the source rocks to allow identification (Tapia-Fernandez et al., 2017). U-Pb-Hf zircon datasets are powerful in studies of provenance and paleogeography of dispersed terranes (Henderson, 2016). Further, the Hf signature of zircons is valuable for the recognition of the generating rocks. Consequently, the study of zircon in placers provides information that restricts the origin of these deposits and the route of transport of grains from source-to-sink, also clarifying the sediment feeding of the surrounding coastal regions such as South Africa (Philander and Rozendaal, 2015), Australia (Reid et al., 2013), and Gulf of Mexico (Tapia-Fernandez et al., 2017).

On the southern Brazilian coast, the characterization of a heavy minerals deposit enriched with titanium minerals and formed during the late Holocene can help in the resolution of the source areas of the Rio Grande do Sul Coastal Plain (RSCP). These deposits have been the subject of investigations about their primary sediment provenance (e.g., Tomazelli, 1978; Villwock et al., 1979; Silva, 1979; Côrrea et al.,

2008; Barros et al., 2010; Carassai et al., 2019; Chemale Jr. et al., 2021). Chemale Jr. et al. (2021) did an integrated assessment of the passive margin in southern Brazil and advanced the understanding, but a lack of resolution remains on the provenance of this placer of world economic value. Munaro (1994) suggested the delta fan associated with the paleo drainage of the Camaquã River as the source of these sediments, while Dillenburg et al. (2004) proposed that the placer was formed from the recycling of the oldest coastal barriers during the last Postglacial Marine Transgression. However, the appreciation of all these previous studies pointed to a controversy concerning the primary source of the heavy minerals forming the placer deposit. For instance, Silva (1979) and Barros et al. (2010) restricted the RSCP's provenance to the adjacent and nearby igneous and metamorphic Paleo and Neoproterozoic rocks of the Sul-Riograndense Shield and the Mesozoic basalts from the Serra Geral Formation, while Tomazelli (1978), Corrêa et al. (2008) and Chemale Jr. et al. (2021) have indicated a provenance contribution from the La Plata River system.

Considering the source area controversy and the estimated large reserve of 150 million tons and 4.66 to 1.02% of heavy minerals (Munaro, 1991; Dillenburg et al., 2004), the placer located in São José do Norte (southernmost of Brazil) was selected as the study area. The determination of heavy-minerals primary origin also impacts the southern Brazilian coastal plain and contributes to understanding other passive margin placers worldwide. So, which source provided the sedimentary supply responsible for developing such deposits? To answer this question and considering the high maturity of the sediments, we sought to define their origin and relationship with the continental areas through the geochronology of detrital zircon by U-Pb and Lu-Hf isotopes. Also, to advance provenance understanding in passive margins, a comparative examination of zircon age distributions with other continents is presented.

2.2 Geological setting

The uplift of the Andes Mountains in the Middle and Late Miocene has conditioned the development of the present drainage systems flowing towards the Atlantic (Potter and Szatmari, 2009, 2015; Lovecchio et al., 2020) (Fig. 1). This uplift was contemporaneous to extensive granite intrusions between 11 and 6 Ma (Melnick et al., 2006).

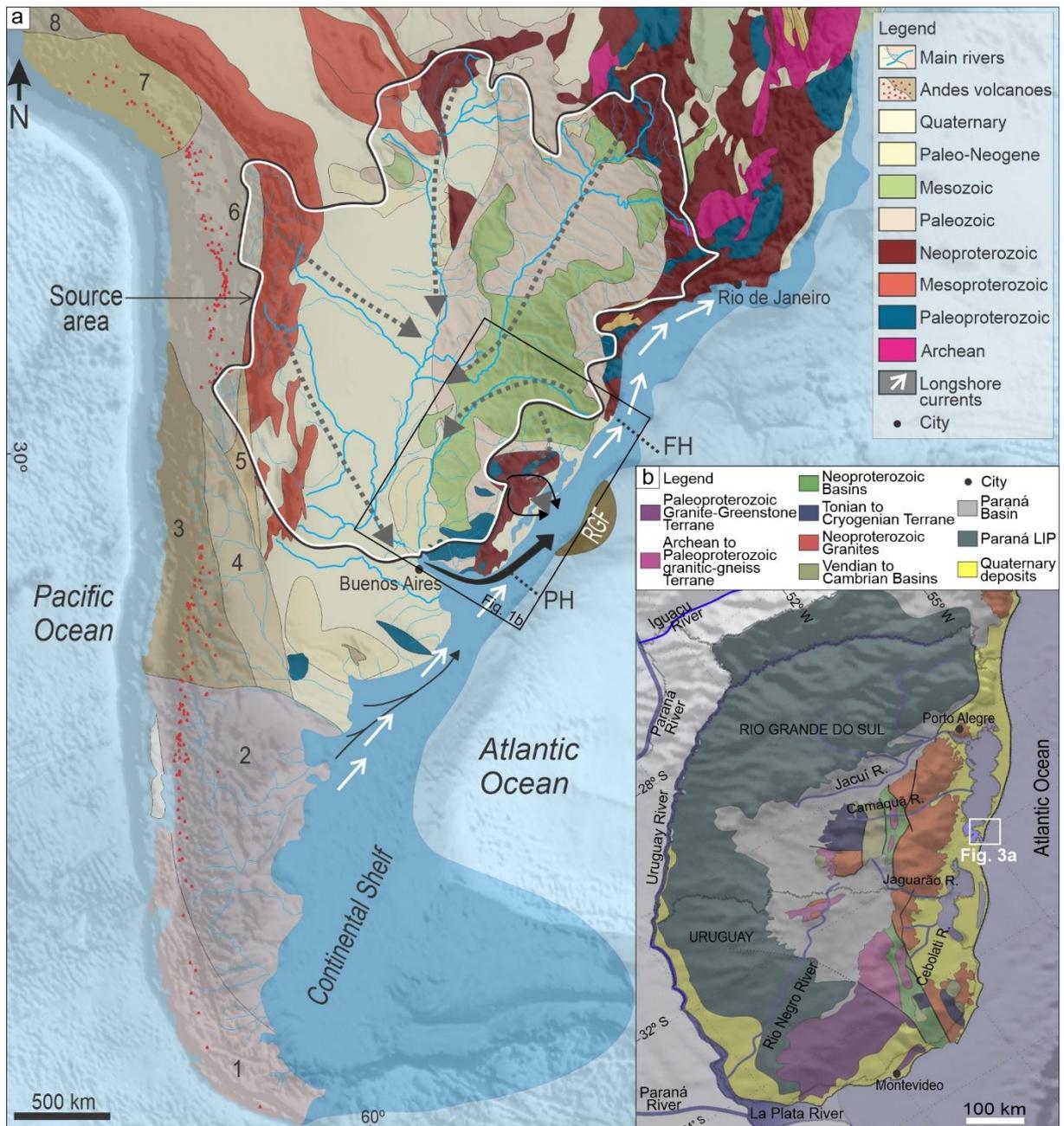


Fig. 1. Simplified geological maps of South America and main rivers that transported sediments from the source areas and supplied the study area at RSCP. **(a)** Main tectonic domains of South America and Andean volcanism, modified from Chemale Jr. et al. (2021), where (1) Southern Patagonia; (2) Patagonia; (3) Chilenia; (4) Cuyania; (5) Famatinia; (6) Arequipa; (7) Antofalla; (8) Paracas (compiled: Bahlburg et al., 2009; Cordani et al., 2016; Ramos, 2008). The geology shown inside the inset in brown and dark blue colors refers to the Uruguayan-Sul-Rio-Grandense Shield. The Pelotas Basin is limited by the Polonio (PH) and Florianópolis highs (FH) with the Rio Grande Submarine Fan (RGF). Significant sediment transport is given by the thicker arrows. **(b)** Geology of southern Brazil and Uruguay; simplified after Chemale Jr. (2000), Tomazelli et al. (2000), and Tapias et al. (2019). The location of Fig. 3a and, therefore, of the study area, is outlined on the map.

On the Atlantic side, the southern continental margin of Brazil, in Rio Grande do Sul state (Fig. 1b), evolved from a rifted limit of plate formed in the early Cretaceous and corresponds essentially to the superficial sediments of the Pelotas

marginal basin (Dillenburg and Barboza, 2014; Dillenburg et al., 2020). The continental shelf is wide (100 to 200 km), shallow (100 to 140 m), and slightly inclined (0.03° to 0.08°), including in the innermost part a low relief coastal plain 20 to 80 km wide and borders land of rocky highlands (Dillenburg et al., 2020). The coastal region is exposed to the open sea and has no discontinuities, except for two lagoon inlets (Dillenburg and Barboza, 2014). The tidal regime is micro-tidal, with an average range of 0.5 m, with a coast dominated by waves (Dillenburg and Barboza, 2014). The direction of the swell wave (dominant) is 180° (south), with average wave heights of 1.0 to 1.5 m (Dillenburg et al., 2020). The coastal drift is towards the north, but the distribution of coastal currents has a bidirectional pattern southwest and northeast (Motta et al., 2015).

The coast of Rio Grande do Sul is slightly undulating and is about 620 km long, consisting of unconsolidated Quaternary deposits that have not received modern contributions from the continent during the middle and late Holocene. Most of the sediment load transported by rivers is retained in lagoons and other coastal environments, such as Patos and Mirim Lagoons (Tomazelli et al., 1998; Toldo Jr. et al., 2006; Motta et al., 2015). Four barrier-lagoon depositional systems form these sedimentary deposits (Fig. 2), designated from the oldest to the most recent from I to IV (Villwock et al., 1986), and aged around 325, 230, 125, and 8 ka (Rosa et al., 2017). According to Rosa et al. (2017), the systems evolved during the Upper Quaternary were developed under a combination of allochthonous and autochthonous processes: eustasy (Delaney, 1965; Villwock e Tomazelli, 1995; Tomazelli and Villwock, 1996), tectonics (Rosa et al., 2009), climate (Martinho et al., 2010; Lopes et al., 2013), coastal dynamics and sedimentary budget (Dillenburg et al., 2000, 2009; Gruber et al., 2003, 2006; Toldo Jr. et al., 2005; Dillenburg and Barboza, 2014). Thus, despite the relative continuity of these systems throughout the RSCP (except for the lagoon-barrier system I), the non-homogeneous evolutionary context, verified mainly in the Holocenic barrier (IV), confers distinct geological and geomorphological characteristics in its extension, with progradational and retrogradational barriers occurring in gentle coastal reentrances and projections, respectively (Dillenburg et al. 2000).

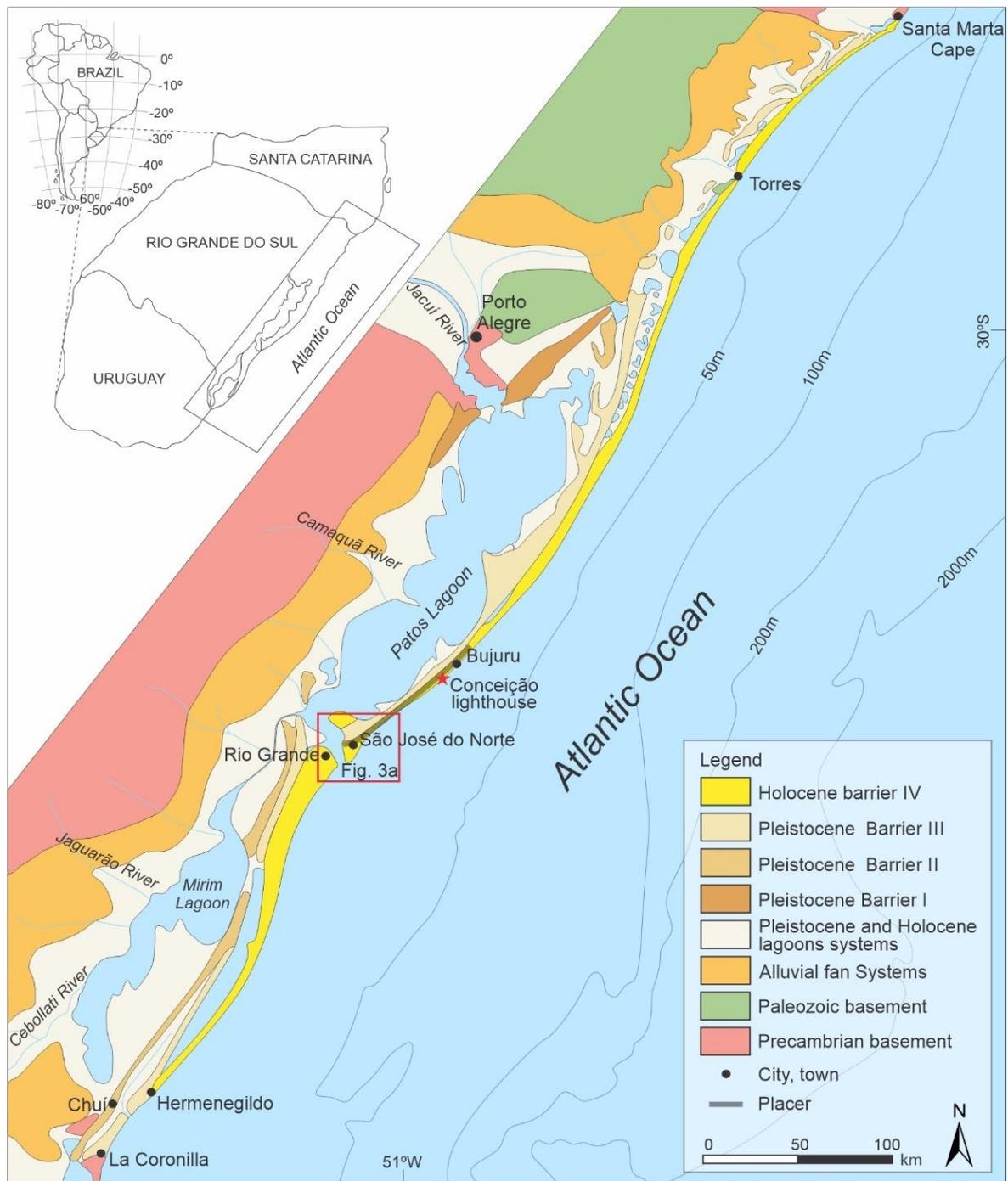


Fig. 2. Simplified geological map of Rio Grande do Sul Coastal Plain, demonstrating the spatial distribution of deposits in the emerged portion of Pelotas Basin. The location of Fig. 3a is outlined on the map. Adapted from Dillenburg and Barboza (2014).

The studied placer stands out among the emerged deposits of the Holocenic barrier (Fig. 2), having developed in the very late Holocene (last 1 ka) (Dillenburg et al., 2004), mainly in the retrogradational sector of the barrier that presently shows the most significant erosional condition on the coast of Rio Grande do Sul. The Conceição lighthouse, distant from the study area by approximately 40 km towards the north, has the highest erosion rates, with an average retreat rate of 3.6 m per year (Barletta and Calliari, 2003; Parise et al., 2009; Motta et al., 2015). The most

considerable amount of heavy minerals in the deposit is found in transgressive dunes, which filled the lagoonal depression at the back of the Holocene barrier in response to the long-term retrogradational condition of the barrier at this coastal sector (Dillenburg et al., 2004). However, high concentrations of heavy minerals (up to 30%) occur in smaller-scale deposits in the backshore and foreshore areas (Dillenburg et al., 2004). The set of heavy minerals in the transgressive dunes consist of ilmenite, zircon, epidote, tourmaline, magnetite, staurolite, rutile, kyanite, leucosene, and others (Munaro, 1994; Dillenburg et al., 2004; Wust, 2021). These grains are well selected and moderately to well rounded, with average grain sizes ranging from 0.062 to 0.105 mm (very fine sand), smaller than the quartz grains that make up the transgressive dunes (0.150 to 0.210 mm - fine sand) (Munaro, 1994; Dillenburg et al., 2004).

2.3 Methods

Eight samples of fine sand of 2356 cm³ each were collected in the backshore and eolian areas at Cassino and São José do Norte beaches, with seven samples from Barrier IV and one from Barrier III (Fig. 3). Heavy and light minerals were separated by established methodology of panning, bromoform ($\rho = 2.89 \text{ g/cm}^3$ at 25°C) and, later, by the Frantz[®] isodynamic separator, varying the amperages 0.1, 0.3, 0.5, and 0.75 A, that aimed at the magnetic separation of minerals of economic and scientific interest. After the separation of heavy minerals by magnetic methods, the typology of the grains and their characteristics were verified (Fig. 3b). Among the non-magnetic minerals, approximately 200 zircon grains from each sample were selected manually and mounted in circular 2.5 cm epoxy sections, which were polished until revealing the grain core. The sections were imaged by a JOEL 6510 scanning electron microscope (SEM) by cathodoluminescence (CL). Finally, the isotopic analyses of U-Pb and Lu-Hf were performed via LA-ICP-MS at the Laboratory of Isotopic Geology of the Federal University of Ouro Preto (UFOP). In total, we analyzed 866 zircons for U-Pb isotopes and 120 for Lu-Hf isotopes, in which the spots of the Lu-Hf analyses were performed on the spots of the U-Pb laser analyses in the same zircon domains. The spots chosen for the Lu-Hf analyses were in concordant grains that showed the most representative ages in the U-Pb analyses, especially young grains, aiming to verify agreement with the previously defined tectonic cycles.

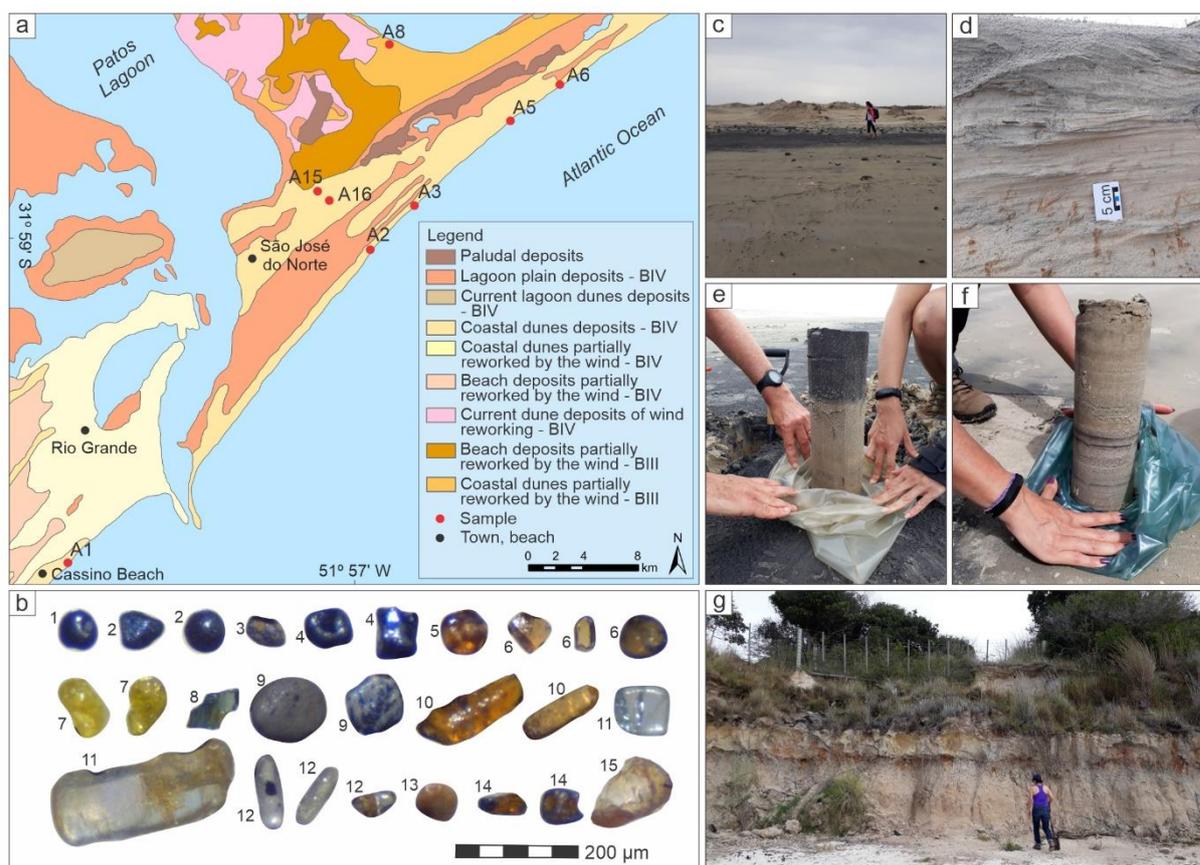


Fig. 3. (a) Geological map of the study area on RSCP, with the location of samples dated by U-Pb in detrital zircons. Geology is based on maps from the Center for the Study of Coastal and Oceanic Geology (CECO), from UFRGS. This region covers deposits of the Barrier-Lagoon III and IV systems. (b) Detail for selected heavy minerals from the sample collected on the backshore. In general, all samples show similar mineralogical compositions differing only in the relative content between each other. In the figure: 1 = magnetite; 2 = titanium-magnetite; 3 = hematite; 4 = ilmenite; 5 = garnet; 6 = tourmaline; 7 = epidote; 8 = amphibole; 9 = leucoxene; 10 = staurolite; 11 = kyanite; 12 = zircon; 13 = monazite; 14 = rutile; 15 = lithic fragment. (c) Surface with exposure of highly concentrated heavy minerals (black level); (d) Heavy mineral-enriched layer in the aeolian deposit; (e, f) Samples with high and low levels of heavy minerals; (g) Marine sediments of Barrier III.

2.3.1 U-Pb geochronology

The U-Pb data were obtained using a Laser Ablation system (CETAC UV Nd: YAG with $\lambda = 213$ nm, with a Helix ablation cell) coupled with a sector field inductively coupled plasma mass spectrometry (Thermo-Fisher Element II). U-Pb zircon data were acquired in peak jumping mode during 20 s background measurement followed by 20 s sample ablation with a spot size of 20 μm , laser energy of 15%, shot frequency of 10 Hz, and shutter delay of 15 s. The spots were placed on the zircon rim to record the latest tectonic events. The common Pb correction was based on the measured composition of ^{204}Pb (of the sample), according to the model of Stacey and Kramers (1975). The decay constant used was that of Jaffey et al. (1971). The

data had their uncertainty propagation following Horstwood et al. (2016). Raw data were corrected for background signal and laser-induced elemental fractional, and instrumental mass discrimination corrected by the reference zircon (GJ-1) using the GLITTER[®] software (Van Achterbergh et al., 2001). To evaluate the precision and accuracy of the results, the following zircon reference materials were analyzed: Plešovice (337 ± 3.8 Ma) (Sláma et al., 2008) and BB-1 (562.58 ± 0.26 Ma) (Santos et al., 2017). The concordant ages obtained during the analysis agreed with the experimental errors: 562.69 ± 2.31 Ma (2σ, n = 41) for BB-1 and 338.69 ± 0.95 Ma (2σ, n = 96) for Plešovice. The ages used were: ²⁰⁶Pb/²³⁸U for grains with less than 1 Ga and ²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb for grains with more than 1 Ga. IsoplotR (Vermeesch, 2018) was used to generate diagrams, histograms, and relative probability plots.

2.3.2 Lu-Hf isotope analyses

Lu-Hf isotopic measurements were determined with a Laser Ablation system (Photon Machine ArF excimer laser 193 nm) attached to a MC-ICP-MS (Neptune). For this work, we analyzed the masses 172, 173, 175, 176, 177, 178, 179, 180, and 181 simultaneously in Faraday cups with axial Faraday cup at the mass 177. Isotope data were acquired using static mode and determination of 50 cycles of 1.054 s. All values were corrected for blank values. Laser operating conditions are Laser output power 5 to 6.5 J/cm², shot repetition rate = 10 Hz, and laser spot of 40 μm. Gas input are Coolant flow (Ar) 15 l/min, auxiliary flow (Ar) 0.8 l/min, carrier flow 0.75 l/min (Ar) + 0.45 l/min (He). To improve sensitivity, N (~ 0.080 L / min) was mixed with Ar and He gas (+ sample) in a gas mixer (Squid) before entering the beam. The zircon patterns used during the Hf analyses were Temora (Black et al., 2003), BB (Santos et al., 2017), Mud Tank (Woodhead e Hergt, 2005), GJ-1 (Morel et al., 2008), and Plesovice (Sláma et al., 2008). The values accepted for ¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf of the patterns obtained an error in agreement with the values recommended in the sessions: 0.282680 ± 0.000031 (n = 10) for Temora, 0.2816713 ± 0.0000028 (n = 13) for BB, 0.282507 ± 0.0000042 (n = 13) for Mud Tank, 0.2820000 ± 0.0000005 (n = 13) for GJ-1, and 0.282484 ± 0.000008 for Plesovice.

The ¹⁷⁵Lu, ¹⁷¹Yb, and ¹⁷³Yb isotopes were monitored during the analysis and their relative abundances were used to calculate interferences of ¹⁷⁶Lu and ¹⁷⁶Yb, which were subtracted from ¹⁷⁶Hf. The data were corrected in an offline Excel spreadsheet, using ¹⁷⁹Hf/¹⁷⁷Hf = 0.7325 by Patchett et al. (1981), ¹⁷⁶Lu/¹⁷⁵Lu = 0.2658 (JWG internal value) and ¹⁷⁶Yb/¹⁷³Yb = 0.796218 by Chu et al. (2002) (see

Gerdes and Zeh, 2006). The initial $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ ratios were calculated using a ^{176}Lu decay constant of $\lambda = 0.01867 \text{ Ga}^{-1}$ by Söderlund et al. (2004).

2.4 Results

The heavy minerals verified in our study (Fig. 3b), in general, are very fine ($\leq 0.1 \text{ mm}$), well rounded, and with high mineralogical and textural maturity, reflecting reworking and rounded rock particles, as well as sections elongated along cleavage. The following minerals were identified: ilmenite, magnetite, titanium-magnetite, hematite, leucoxene, garnet (possibly of the almandine type), staurolite, tourmaline, zircon, rutile, epidote, kyanite, amphibole (possibly hornblende), and monazite. Spinel and apatite were rarely seen. As for size, opaque minerals are generally smaller than translucent minerals, as seen in Fig. 3b. The morphology and ages of some RSCP zircons are presented in Fig. 4.



Fig. 4. RSCP zircons morphology for each sample and respective U-Pb ages and ϵ_{Hf} . A1, A2, A3, A5, and A6 are samples of BIV's backshore; A8 is a sample of BIII beach deposit; A15 and A16 are samples of the BIV eolian system. The spots of the Lu-Hf analyses were performed on the spots in the same zircon domains of the U-Pb laser analyses. Some acicular crystals were observed among the samples, referring to volcanic and/or intrusive sources of rapid crystallization. Metamorphic zircons, characterized by irregular and resorptive shapes, were also identified (Corfu et al., 2003). In addition, growth zoning with bimodal and polymodal successions, xenocrystic nuclei (revealing a later growth in a new crystallographic orientation), inclusions, and fractures are present in some grains.

The samples from Barriers III and IV in São José do Norte and Cassino Beach have zircon provenance with ages between 0.56 ± 0.64 and $3694 \pm 54.3 \text{ Ma}$ (see Supplementary Table S1). The age pattern of the 866 analyzed grains reproduces

geological time intervals, presented for each sample in Table 1. For the analyzed grains, the tectonic intervals are Andean cycle (9.1%), Late to post Gondwanides-Andean (9.2%), Gondwanides (7.5%), Famatinian (3.7%), Pampean (3.7%), Neoproterozoic (35.3%), Mesoproterozoic (10.2%), Paleoproterozoic (18.8%) and Archean (2.4%).

As shown in Table 1, the area sampled in São José do Norte presented considerable quantities of young grains, Andean cycle derived, <50 Ma old (from 6.3% to 12.7%). Some samples from Barrier IV contain up to 10% of young grains. Sample A8, Barrier III, shows the largest concentration of young grains, with 12.7%. Whereas Sample A1, Barrier IV (Cassino beach), shows the lowest concentration of young grains with only 5.2%. Among zircons grouped in the Andean cycle (79 grains out of the 866 analyzed), about 85% are aged below 20 Ma (Fig. 5).

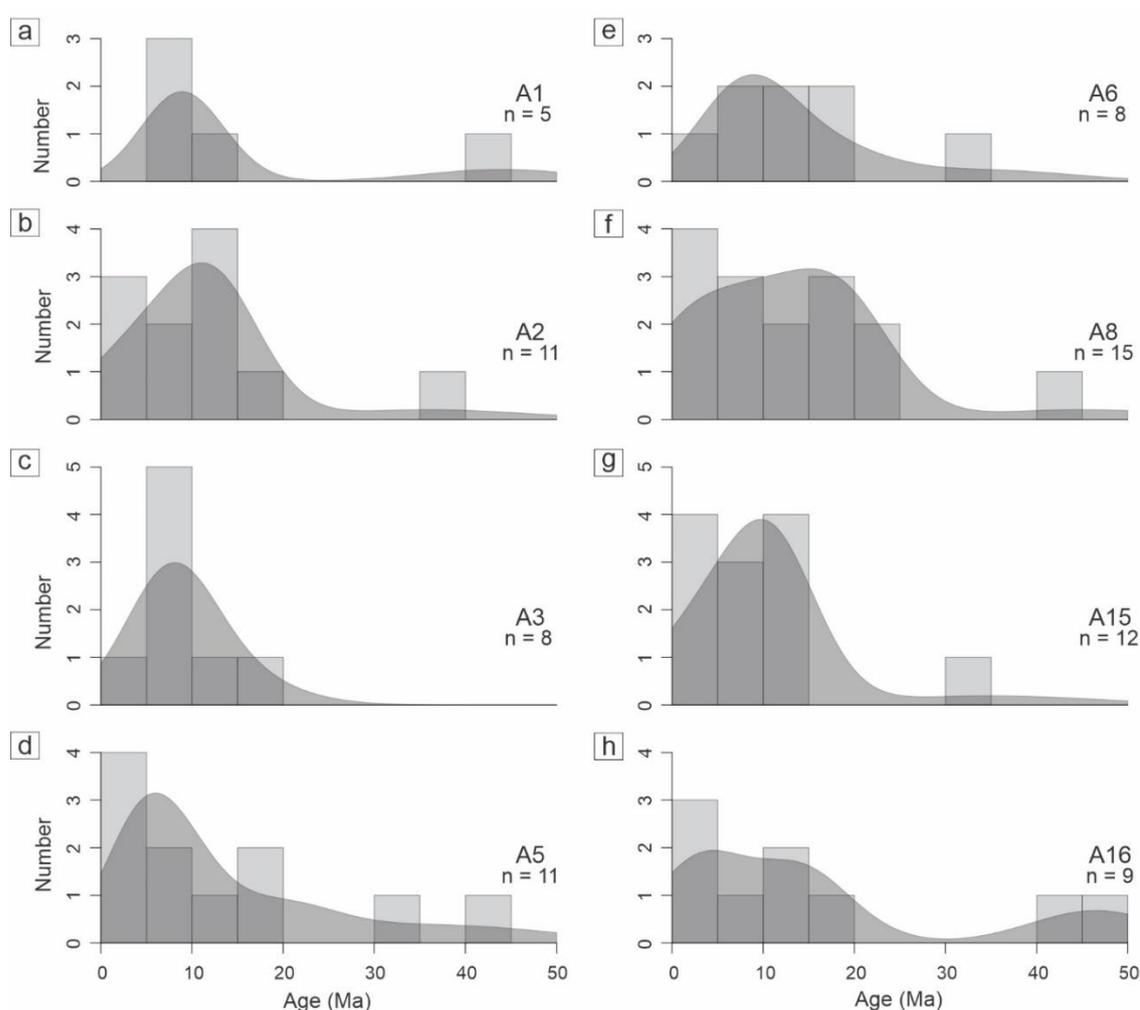


Fig. 5. Probability density diagram plots of U-Pb ages of detrital zircons from the Andean interval. Note that most of the analyzed grains are younger than 20 Ma. **(a)** Sample A1, with 5 zircons analyzed; **(b)** sample A2, with 11 zircons analyzed; **(c)** sample A3, with 8 zircons analyzed; **(d)** sample A5, with 11 zircons analyzed; **(e)** sample A6, with 8 zircons analyzed; **(f)** sample A8, with 15 zircons analyzed; **(g)** sample A15, with 12 zircons analyzed; **(h)** sample A16, with 9 zircons analyzed.

Table 1. Distribution of tectonic intervals according to the set of samples analyzed and total zircon. At the bottom of the table, lava flows from the Serra Geral Group, the Lower Andean interval, the Brasiliano and Grenville cycles in South America are considered.

Tectonic cycle	Interval (Ma)	A1		A2		A3		A5		A6		A8		A15		A16		All zircon	
		n	%	n	%	n	%	n	%	n	%	n	%	n	%	n	%	n	%
Andean	0 - 50	5	5.2	11	9.2	8	6.3	11	10.9	8	7.6	15	12.7	12	10.9	9	10.2	79	9.1
Late to Post Gondwanides-Andean	230 - 50	5	5.2	16	13.3	12	9.4	12	11.9	11	10.5	5	4.2	14	12.7	5	5.7	80	9.2
Gondwanides	230 - 380	4	4.1	10	8.3	6	4.7	11	10.9	4	3.8	10	8.5	6	5.5	14	15.9	65	7.5
Famatinian	500 - 380	5	5.2	4	3.3	9	7.1	5	5	0	0	7	5.9	1	0.9	1	1.1	32	3.7
Pampean	500 - 541	8	8.2	2	1.7	4	3.1	3	3	3	2.9	5	4.2	6	5.5	1	1.1	32	3.7
Neoproterozoic cycles	1000 - 541	26	26.8	50	41.7	57	44.9	33	32.7	40	38.1	26	22	45	40.9	29	33	306	35.3
Mesoproterozoic cycles	1600 - 1000	13	13.4	9	7.5	13	10.2	8	7.9	11	10.5	21	17.8	7	6.4	6	6.8	88	10.2
Paleoproterozoic cycles	2500 - 1600	25	25.8	15	12.5	15	11.8	17	16.8	26	24.8	28	23.7	17	15.5	20	22.7	163	18.8
Archean cycles	4000 - 2500	6	6.2	3	2.5	3	2.4	1	1	2	1.9	1	0.8	2	1.8	3	3.4	21	2.4
	Total	97	100	120	100	127	100	101	100	105	100	118	100	110	100	88	100	866	100
Paraná lava flows and Early Andean	140 - 120	0	0	3	2.5	1	0.8	2	2	0	0	1	0.8	2	1.8	0	0	9	1.0
Dom Feliciano, Brasiliano	541 - 700	17	17.5	24	20	33	26	24	23.8	26	24.8	12	10.2	36	32.7	9	10.2	181	20.9
São Gabriel, Brasiliano	700 - 850	6	6.2	19	15.8	13	10.2	8	7.9	8	7.6	8	6.8	8	7.3	14	15.9	84	9.7
Grenville Cycle	1300 - 900	11	11.3	10	8.3	15	11.8	7	6.9	14	13.3	14	11.9	7	6.4	10	11.4	88	10.2

On the other hand, the highest zircon concentrations of the total analyzed occur in the Neoproterozoic, Paleoproterozoic, and Mesoproterozoic ranges. The Pampean and Famatinian cycles are less significant, both representing 3.7% of the total grains analyzed, and the Archean, with coverage of only 2.4% of the total grains. The largest occurrence of Archean zircons (6.2%) was found in the Cassino sample. In contrast, the sample from Barrier III, in São José do Norte, has the lowest content (0.8%).

Besides, we present the distribution within the large tectonic cycles at the bottom of Table 1, considering the lava flows from the Serra Geral Group (Paraná Basin), the Brasiliano cycle (Dom Feliciano Belt and São Gabriel Terrane), and the Grenville cycle. Among the intervals shown in Table 1, the lava flows from the Serra Geral Group (Paraná Volcanic Province) and the Early Andean interval are equivalent in terms of age.

The distributions of the identified tectonic intervals and the ages obtained are presented in the probability density function graph (Fig. 6). According to the data, the most significant contribution occurred from the Andean and Brasiliano orogens. On the other hand, the contribution of Archean grains is low, with peaks occurring close to 3 Ga.

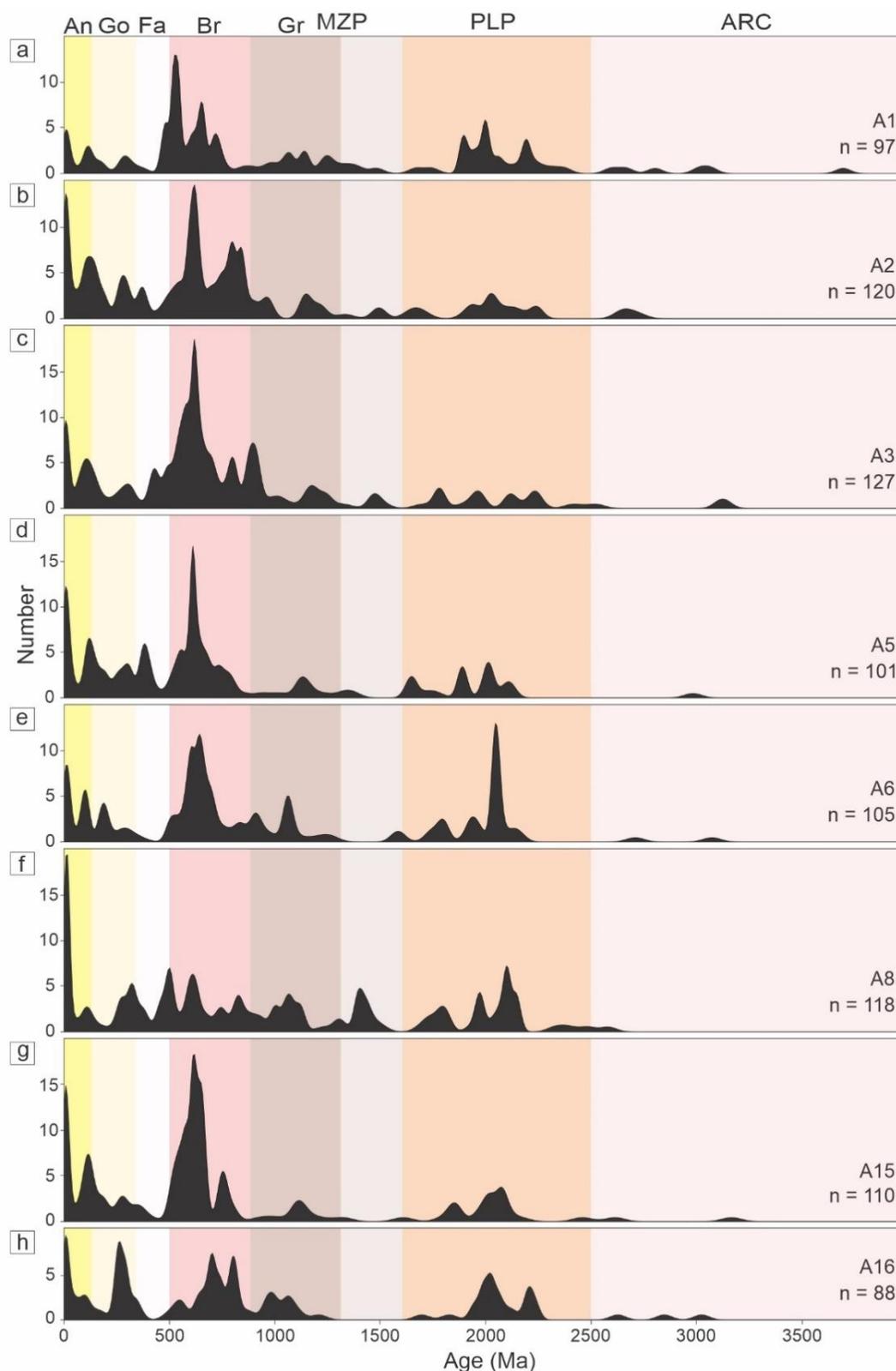


Fig 6. U-Pb frequency plot of ages from zircons from the São José do Norte region, in the Rio Grande do Sul Coastal Plain, from the present study, and the main orogenic events in South America (An: Andean; Go: Gondwanides; Fa: Famatinian; Br: Brasiliano; Gr: Grenville; MZP: Mesoproterozoic; PLP: Paleoproterozoic; ARC: Archean). Note the prominent high-frequency peak of Andean and Brasiliano zircons. (a) Sample A1, with 97 zircons analyzed; (b) sample A2, with 120 zircons analyzed; (c) sample A3, with 127 zircons analyzed; (d) sample A5, with 101 zircons analyzed; (e) sample A6, with 105 zircons analyzed; (f) sample A8, with 118 zircons analyzed; (g) sample A15, with 110 zircons analyzed; (h) sample A16, with 73 zircons analyzed.

Also, 120 dated zircons with U-Pb ages ranging from 1500 Ma to recent were selected for Hf isotope analysis (Supplementary Table S2). The grains $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ ratios are below 0.0036, present-day $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ ratios are between 0.281555 and 0.283042 corresponding to present-day ϵHf values between -43 and +9, and $\epsilon\text{Hf}(t)$ values between -14 and +13.

Results and interpretations are summarized in Fig. 7. Four distinct groups were previously identified: one with young ages (around 50 Ma) and positive $\epsilon\text{Hf}(t)$ values; another aged about 250 Ma and negative $\epsilon\text{Hf}(t)$, however more positive in the early stage with 380 Ma; the third one comprises a large age range, between 500 to 800 Ma with dominantly negative $\epsilon\text{Hf}(t)$ signature; and, finally, the fourth group of zircons occurs between 1000 and 1500 Ma with a concentration of a predominantly positive $\epsilon\text{Hf}(t)$, but with records of grains with negative $\epsilon\text{Hf}(t)$. The zircon Hf pattern for the ages between 0 and 400 Ma and 0 and 60 Ma can be observed in Fig. 7b,c. The distribution and the highest density of younger grains (Fig. 7c) occur for the range of 0 to 20 Ma with positive $\epsilon\text{Hf}(t)$ values close to +5. Fig. 7b reveals the presence of a fifth group, with $\epsilon\text{Hf}(t)$ trends closer to 0, between +3 e -4, which occurred at ~380 Ma.

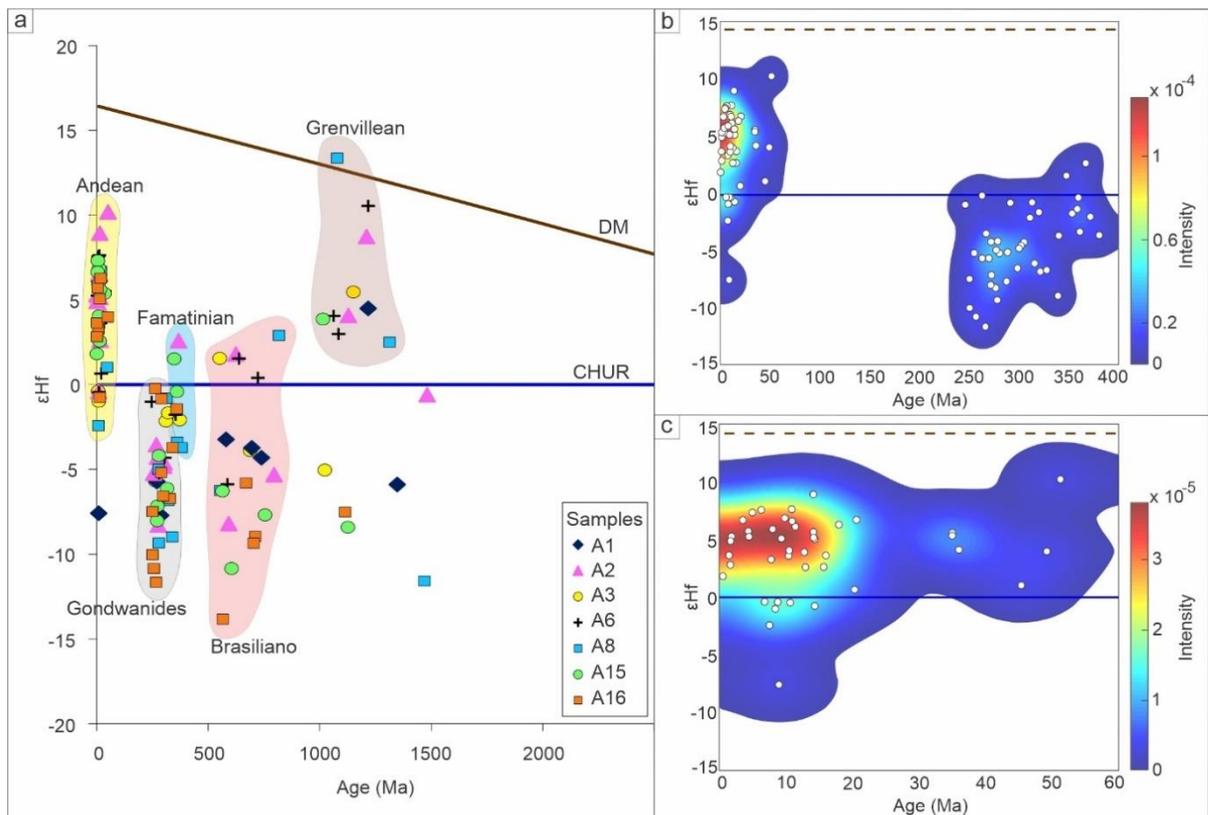


Fig. 7. (a) ϵHf versus U-Pb zircon age of the selected sample of detrital zircons from the RSCP. (b, c) Age- $\epsilon\text{Hf}(t)$ plot of normalized bivariate kernel density estimates (KDEs) using HafniumPlotter version 1.4, performed for 0 to 400 Ma (b) and 0 to 60 Ma (c), focusing on younger ages. Contours are plotted at 95% (1σ) of peak density. The Andean, Gondwanides, Famatinian, Brasiliano, and Grenvillean orogens are identified.

2.5 Discussion

To investigate the provenance of a significant Ti-Zr placer in the Holocene, located on an extensive coastal plain that stretches in southern Brazil, we used U-Pb isotopes of 866 detrital zircons and the Hf isotopic signature of 120 detrital zircons. These analyses enabled a qualified zircon classification and source area identification, with reliable results, including a significant contribution of Andean-related zircons.

2.5.1 U-Pb analysis and derivation of the zircon grains

Among the detrital zircons analyzed for U-Pb isotopes, for samples obtained from the RSCP (Barriers III and IV), 9.1% of the total and up to 12% in some samples of this study are noticeably young (<50 Ma). This contribution is restricted to the Andean-derived zircons in South America (e.g., Pepper et al., 2016).

On the other hand, large age concentrations of zircon in the Neoproterozoic, Mesoproterozoic, and Paleoproterozoic point to sources in the Uruguayan-Sul-Riograndense Shield, Paleozoic Paraná Basin, and the Andean basement (Ramos, 2008; Bahlburg et al., 2009; Philipp et al., 2016; Canile et al., 2016; Cordani et al., 2016; Tedesco et al., 2019). The Brasiliano Cycle, for example, has a great expression (Fig. 6), representing the Dom Feliciano Belt and including the São Gabriel Terrane. Meanwhile, the Grenville cycle (mobile range Sunsás - Andes, in South America) can contribute up to 10% of the total (Table 1; Fig 6).

Chemale Jr. et al. (2021) carried out a systematic study on the four coastal barriers of the RSCP (I, II, III, and IV) in the northern coast of Rio Grande do Sul (RS). They pointed to the La Plata River drainage system as a significant feeder of sediments to the RS continental margin. Their study recognized up to 3% of zircon grains as younger than 40 Ma. Also, their results include an increase in the presence of zircons aged from 500 to 800 Ma. This enrichment in Neoproterozoic grains is related to the proximity between the two oldest barriers (I and II) and the Proterozoic Shield (Chemale Jr. et al., 2021). However, the young detrital zircons of Andean-derived contribution were identified, in a lesser abundance, since Barriers I, II, and III (Chemale Jr. et al., 2021). In its turn, our study was carried out on the mid-coast of RS Quaternary deposits, which contain the Ti-Zr deposits, located 200 km south, focusing on the two most recent coastal barriers (III and IV) only. In this area, closer to the mouth of the La Plata River system, we observed an enrichment of Andean-derived grains relative to Chemale Jr. et al. (2021) study.

2.5.2 Hf signature implications for RSCP zircons

Hf signatures of zircons at the times of crystallization ($\epsilon\text{Hf}_{(t)}$) provides crucial information of the nature of the crust from which the zircon was derived, recording crustal-scale processes of addition, removal, and recycling of crust (Balgord, 2017). Thus, Hf-isotopic compositions with positive $\epsilon\text{Hf}_{(t)}$ values indicate derivation from the depleted mantle (juvenile signature), while negative $\epsilon\text{Hf}_{(t)}$ values indicate the recycling of pre-existing continental crust (Bahlburg et al., 2011).

The South American continent consists of several Archean-Paleoproterozoic cratons that were accreted during the Mesoproterozoic to through early Paleozoic orogenesis (Goodwin, 1996; Pepper et al., 2016). Therefore, the geological evolution of South America, such as the formation of the Andean orogen along the Pacific margin (Pepper et al., 2016), involves patterns of magmatism and crustal generation, as also a rework of these old cratonic cores, which implies Hf isotopic signatures that are more evolved or more juvenile. Hf isotopic data from the RSCP detrital zircons are quite variable in the patterns through time. As shown on Fig. 7a, we identified five zircon populations based on Hf isotopic signature.

Between about 1500 to 900 Ma, we have juvenile grains and subordinate fractionated zircon grains (+15 to -13). This situation could indicate a juvenile magma mixed with recycled crustal material or two different sources. However, we interpreted and associated this signature to the Grenville Cycle (e.g., Ramos et al., 2014a). For Bahlburg et al. (2009, 2011), these $\epsilon\text{Hf}_{(t)}$ values for Grenville derived zircon grains suggest that juvenile magmas incorporate a minor component of Archean to Paleoproterozoic crust. Pepper et al. (2016) point that between ca. 1600 to 1000 Ma, $\epsilon\text{Hf}_{(t)}$ values in the Central and South Andes tend to become more positive, reflecting progressive incorporation of juvenile magmas. In contrast, $\epsilon\text{Hf}_{(t)}$ in the North Andes remain intermediate in value, given the proximity of the Sunsas belt and the latter history (prior to ca. 1600 Ma, most grains record Paleoproterozoic reworking of older Archean crustal materials) relevant for the Mesoproterozoic crustal evolution of northwestern South America (Pepper et al., 2016). According to Ibanez-Mejia et al. (2015), this prolonged evolution consist of at least two main intervals: an earlier one dominated by overall crustal growth associated with the development of a long-lived accretionary arc system, and a later interval characterized by mixed geochemical geochronological evidence that indicates the simultaneous occurrence of mechanisms that induce additions of juvenile crust and older crust reworking along the margin. Still, in the Paraná Basin, zircons with Hf signature show both juvenile

and crustal sources and are attributed to Grenvillian rocks from Argentina (Canile et al., 2016).

Zircons aged between 800 to 500 Ma present negative $\epsilon\text{Hf}_{(t)}$ and demonstrate a crustal contribution, which is interpreted corresponding to the Brasiliano or Pampean cycle (Fig. 7). Other works describe for ages between 1000 to 500 Ma $\epsilon\text{Hf}_{(t)}$ signatures that are generally similar to average crustal evolution, reflecting mainly reworking of >1000 Ma crustal materials, with little addition of juvenile magma that occurred in Brasiliano orogens (Bahlburg et al., 2011; Pepper et al., 2016). Zircons with this signature occur widespread in the Eastern Andes (Pepper et al., 2016), and also in the Southernmost Brazilian and Uruguayan shields and Paleozoic Paraná Basin (Philipp et al., 2016; Canile et al., 2016; Tedesco et al., 2019).

Pepper et al. (2016) describe to Early Paleozoic (500–400 Ma) magmatism $\epsilon\text{Hf}_{(t)}$ values that remain intermediate or become slightly more positive in the Central and South Andes. According to the authors, this positive deviation from average crustal evolution suggests that the Early Paleozoic magmatism along the Andean margin may have occurred in an overall extensional tectonic regime with thinned continental crust and significant additions of mantle-derived melt. That way, between ca. 500 and 400 Ma, increasing juvenile magmatism in the Central Andes resulted from extension and crustal thinning throughout the Famatinian and related magmatic arcs (Bahlburg et al., 2009; Ramos et al., 2014; Ducea et al., 2015; Pepper et al., 2016). Also, in the 400–360 Ma, following a magmatic lull, there was significant juvenile magmatism in proto-Andean arc terranes, followed by a trend towards greater interaction with older crust until ca. 250 Ma (Pepper et al., 2016). We identified $\epsilon\text{Hf}_{(t)}$ trends between +3 e -4 at ~380 Ma (Fig. 7b), which we interpreted as Famatinian arc-derived zircons.

The zircon population that covers the Late Paleozoic, aged about 250 Ma and presenting negative $\epsilon\text{Hf}_{(t)}$, shows significant crustal recycling, and it was interpreted as the Gondwanides cycle (Fig. 7a,b). For that time (ca. 360 to ca. 250 Ma), there is an overall trend towards more negative $\epsilon\text{Hf}_{(t)}$ values, where evolved signatures reflect the increased involvement of older crustal materials in late Paleozoic magmatic arcs established along the Andean margin (Pepper et al., 2016; Balgord, 2017).

Finally, young zircons (<50 Ma) present a positive $\epsilon\text{Hf}_{(t)}$ trend, demonstrating a mantle contribution, referring to the Andean cycle. The highest concentration of these grains occurs in the range of 20 to 0 Ma (Fig. 5; Fig. 7c), supporting the cyclicity theory of Andean magmatism (Pepper et al., 2016; Haschke et al., 2002; Ramos,

2009; Ramos et al., 2014b). Also, the ca. 50 to 20 Ma period correlates with low accumulation rates at the latitude of 38°S (Balgord, 2017), with relative quiescence due to low convergence velocities and afterward a period of magmatic recharge. According to Pepper et al. (2016), Andean zircons younger than ca. 35 Ma yield highly variable $\epsilon_{\text{Hf}(t)}$ values, between -15 to +15, reflecting the wide range of tectonic settings along the magmatic arc, from areas of crustal thickening where magmas are forming due to crustal melting, to areas of extension where mantle-derived melts are present. Thus, there is a spatial variation with more juvenile values in the northern and southern Andes and more evolved values in the central Andes (Pepper et al., 2016; Balgord, 2017). Our data show a juvenile trend which, therefore, means a more extensional tectonic configuration.

2.5.3 Source areas, sediment dispersion, and related drainage systems

The variety and distribution of heavy minerals in the study area and the predominance of very fine-grained and highly mature sediments point to multiple source areas (Carassai et al., 2019; Chemale Jr. et al., 2021) and long transportation processes and reworking of grains, also associated with the recycling of older coastal barriers (Dillenburg et al., 2004). Furthermore, the geographic position of placer deposits in the southern Brazil coast was caused by the availability of heavy minerals in the vicinity of the continental shelf, transported by paleodrainages in the past (Munaro, 1994).

However, the detrital zircon U-Pb ages obtained from samples of the RSCP (Barriers III and IV) strongly indicate the La Plata River drainage system as the primary contributor feeding the northwards littoral drift. The source areas of the Uruguayan-Sul-Riograndense Shield and Paraná Basin are eroded and drained by rivers that directly supply the RSCP, e.g., Jacuí, Camaquã, Piratini, and Cebolati Rivers (Munaro, 1994; Côrrea et al., 2008; Barros et al., 2010; Carrasai et al., 2019; Chemale Jr. et al., 2021). However, their drainages system covers only a small portion of these areas. On its turn, the La Plata River is one of the world's largest river systems, draining and eroding much of South America from the Andes to the Brazilian shield (Piola et al., 2005). Thus, the young grains are supplied only by the La Plata River system for the RSCP, which also feeds the RSCP with zircons eroded from areas with similar signatures to the Jacuí, Camaquã, Piratini, and Cebolati Rivers.

To improve source areas and sediment dispersion delimitation in the Quaternary deposits, the U-Pb-Hf signature allowed us to identify different geological terranes with similar ages but different Hf isotope signatures. As a key to understanding the sedimentary sources, our data enabled us to distinguish the Cenozoic juvenile zircon grains derived from magmatic arc rocks accreted during the subduction of the Nazca Plate under the South American Plate (Pepper et al., 2016; Balgord, 2017). Significant and surprising results of detrital zircons younger than 50 Ma, and with similar $\epsilon\text{Hf}(t)$ juvenile values to the northern and southern Andes Orogeny (Pepper et al., 2016; Balgord, 2017), occur in the middle coast of the RSCP (south of the Brazilian passive margin) in a current geological context. Based on the physiographic boundaries of the Rio de La Plata drainage system, it is possible to indicate that the younger grains are specifically sourced by the southern Andes. The Hf signature also enables us to distinguish zircons of Famatinian and Grenvillean age with depleted mantle material source, as described by Ramos et al. (2014), Canile et al. (2016), and Pepper et al. (2016) for the Famatinian and Grenville aged basement rocks in the Argentinian Andes. The Brasiliano Orogen (Neoproterozoic to Eopaleozoic) signature provided the signature of the Uruguayan-Sul-Rio-Grandense Shield (southernmost Brazil and Uruguay) or Pampean Terrane, that consists of a complete Wilson Cycle yielding juvenile to recycled zircon through the accretional processes. Thus, our findings support and more than that indicate a much higher influence of the La Plata River as a source of sands for the RSCP during the Quaternary than previously stated by several studies (e.g., Urien and Ewing, 1974; Rocha et al., 1975; Tomazelli, 1978; Lorscheitter and Romero, 1985; Corrêa et al., 2013).

In fact, the so-called La Plata River is an estuarine system, corresponding to a sea entrance of approximately 300 km. Inside the estuary, the Paraná River builds a large bay-head delta with sediments coming from a giant drainage system that includes tributaries draining rocks from the Andean interval. Thus, the La Plata estuary is the terminal section by which the Parana River transfers sediments containing young zircons (<50 Ma) to the eastern South America continental margin. The massive presence of young grains, which comprises only a minor component of the western tributaries of the La Plata River system drained area (Pepper et al., 2016), allows us to point that the La Plata system represents the main feeder of the RSCP sedimentary system. Local drainage systems such as the Cebolatti (Uruguay), Jaguarão, Camaquã, and Jacuí (Rio Grande do Sul) Rivers are defined as proximal

sources, contributing with a smaller volume of sediments and furnishing old age zircons only, compared to the La Plata River drainage system (Fig. 1).

2.5.4 Nataka, Gulf of Mexico, Eucla Basin, and RSCP Ti-Zr placers

To advance provenance understanding in passive margins, we examined the age distributions of zircon from other continents. The crystallization ages of detrital zircon, grouped into peaks, as seen in Fig. 6, indicate that the sedimentary record is a valid representation of the magmatic record (Hawkesworth et al., 2010) and therefore reflects the tectonic scenario of the depositional basin (Cawood et al., 2012). For example, at the edges of the converging plate, there is a large proportion of zircon ages close to the age of sediment deposition. In contrast, sediments in collisional, extension, and intracratonic configurations contain larger proportions with older ages that reflect the underlying basement history (Cawood et al., 2012). Fig. 8 is based on Cawood et al. (2012) and demonstrates these three basin configurations; fields overlap because the basins evolved and changed with the tectonic regime. According to Cawood et al. (2012), these differences can be resolved by plotting the difference distribution between the measured crystallization ages (CA) of individual zircon grains present in the sediment and the deposition age (DA) of the sediment. Therefore, the connection between the basin and their source areas can be reached by the definition of the tectonic environment in which sediments were deposited.

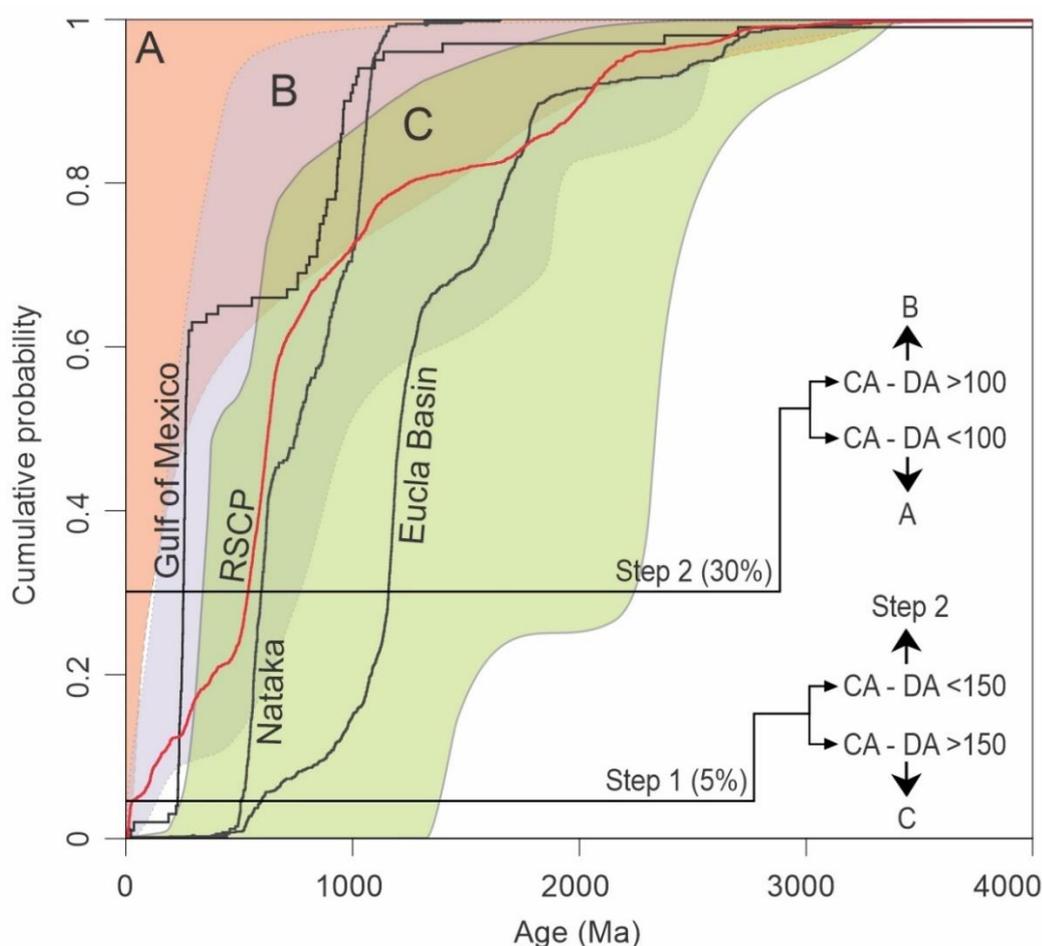


Fig. 8. General fields for convergent (A: orange field), collisional (B: grey field), and extensional basins (C: green field), based on Cawood et al. (2012), from which it is possible to predict the tectonic setting of sedimentary packages of unknown origin, based on differences between the crystallization and depositional ages (CA – DA) of the zircons. In this diagram, extensional (including intracratonic) settings have CA – DA greater than 150 Ma in the youngest 5% of the zircons (step 1), and all convergent settings have CA – DA less than 100 Ma in the youngest 30% of zircons (step 2). Here, we compare the RSCP U-Pb zircon data (this work and data from Chemale Jr. et al. 2021) with results obtained in other regions of coastal Ti-Zr placers studied worldwide, as in Eucla Basin (Reid et al., 2013), Nataka deposits (Elias, 2016), and the Gulf of Mexico (Tapia-Fernandez et al., 2017).

We compared our age spectrum of detrital zircon of the RSCP (added to the ages of Chemale Jr. et al., 2021) with other studies in coastal placer regions: Nataka (eastern Africa) (Elias, 2016), Gulf of Mexico (Mexico) (Tapia-Fernandez et al., 2017) and Eucla Basin (Australia) (Reid et al., 2013).

In the Nataka deposit, U-Pb detrital zircon age distribution reveals four different age groups, ca. 1400 to 1200 Ma, 1100 to 900 Ma, 900 to 700 Ma, and 600 to 500 Ma. The 1400 to 1200 Ma group is older than Grenville and East Africa Antarctica (Elias, 2016). Therefore, according to Elias (2016), the sediments originated mainly from the Mozambique belt, except for the group aged 1400 to 1200 Ma, which is interpreted as coming from Zimbabwe (distal source) through the

Zambezi River, which crosses NW Mozambique and flows into the Indian Ocean in a distant area of Nataka, south of the deposit.

In the southwestern Gulf of Mexico, the scarcity of rounded zircon grains reveals a short transport history. At the same time, U-Pb analyses on detrital zircon indicate that source rocks were from age groups dominated by the Mesozoic-Paleozoic (~251–286 Ma and ~216–249 Ma) and Proterozoic (~551–996 Ma) (Tapia-Fernandez et al., 2017). Tapia-Fernandez et al. (2017) interpret the Massif Complexes of Chaucus, Oaxacan, and Chiapas as potential contributors of sediments transported by the Usumacinta, Coatzacoalcos, and Grijalva Rivers and redistributed by the longshore currents to the north. These currents operate throughout the Gulf of Mexico to distribute sediments and form placers (Kasper-Zubillaga et al., 2016).

For the Eucla Basin, detrital zircons are divided into two main groups of provenance: c. 1300–1100 Ma and c. 1700–1500 Ma; the first group coming from the province of Musgrave (main primary source), and the second group with a mixed origin, with younger zircons derived from Musgrave and others from the Albany-Fraser Orogen (Reid et al., 2013). These isotopic data follow the sedimentological characteristics of the Eucla Basin, in which large rivers drained into the basin of the Musgrave province and, to a lesser extent, from the Albany-Fraser Orogen. In addition, the coastal drift flowed from west to east, forming beach placers due to the interaction of west coast drift and coastal traps (Reid et al., 2013).

The diagram of Fig. 8 compares the RSCP U-Pb zircon data (including data from Chemale Jr. et al., 2021) with results from Nataka, Gulf of Mexico, and Eucla deposits. Step 1 shows the distribution pattern of the RSCP zircon in the field of convergent and collisional basins due to the significant contribution of very young grains. This relationship exists in zircon from the present work, coming from the Andean region of South America. In step 2, the RSCP zircon age spectrum falls in the configuration of an extensional basin, which we know to coincide with the current tectonic geological context in the RSCP. The behavior of the Eucla basin and the Nataka deposits is similar, with integral features of an extensional basin. However, the Gulf of Mexico zircon age spectrum shows another pattern of zircon distribution compared to the RSCP, Eucla, and Nataka deposits, with the zircon curve falling in the collisional and close to the extensional tectonic configuration. Thus, at least three placer systems occur worldwide: one entirely from an extensional basin (Eucla and Nataka), for which there is no contribution of zircon with young ages, that is, ages

close to the age of sedimentation; a system that presents zircon grains with crystallization age very close to those of sedimentation of the basin in step 1, but which is classified as an extensional basin according to step 2 (RSCP); and one with zircons with similar crystallization and sedimentation ages in steps 1 and 2, characterized as a collisional basin, but with configurations still very close to that of an extensional basin according to deposition step 2. Despite that, all are well-described passive margin deposits. Therefore, the tectonic setting of sedimentary packages of unknown origin can be predicted, as done in this work, following Cawood et al. (2012). However, tectonic prediction depends on the presence of an active or inactive orogen in the continent to be reached by sourcing rivers in all three extensional, collisional, and convergent fields.

In the Nataka and Eucla deposits, there is no active orogen nearby, contributing to the sedimentation of these deposits. In the case of the Eucla Basin, no active orogen is present in the Australian continent. In the case of RSCP, the active orogen of the Andes in South America present in the opposite margin can influence deposition in the passive margin through an extensive sourcing drainage system. Similarly, for the Gulf of Mexico, an active orogen in the continent strongly influences the mineralogical composition of sediments in the basin. Thus, in deposits like those studied here at the RSCP, active orogenesis in the continent provides the source for these passive margin deposits to present grains with young crystallization age. In this case, the crystallization age of zircon is very close in many grains to the sedimentation age of the basin. This information presented in this study provides a criterion for identifying active or inactive orogeneses in the continents, which can be applied when studying passive margins of the geological past.

Likewise, provenance studies in these locations reveal the importance of coastal currents in transporting grains, as in the case of the RSCP, seen in Fig. 1a. The transfer of sediments to the north is mainly (nearly exclusively) performed by the coastal currents within the wave-breaking zone (Toldo Jr. et al., 2006; Dillenburg and Barboza, 2014; Motta et al., 2015). After the long transport inside the continent through rivers, the sediments that form the current beach deposits reached the Atlantic Ocean during the last period of low sea and moved north by longshore currents. During the last period of high sea, sediments were deposited onshore, forming the sandy coastal barriers observed today, including the world-class Ti-bearing placer of São José do Norte. The same process that we see in the formation of these sandy coastal deposits on the southern Brazilian coast occurs for the three

placer locations compared above, with the difference that we embrace even more distal sources in the composition of the RSCP. However, in the examples mentioned, the sources are usually more proximal than our study, which involves sediment from an active margin in the construction of a passive margin.

2.6 Conclusions

The variety and distribution of heavy minerals in the study area and the predominance of very fine and highly mature sediments point to multiple source areas in the RSCP. To delimit the provenance of the Holocene placer of São José do Norte, the U-Pb-Hf isotopic signature made it possible to distinguish different geological terrains with similar ages but different isotopic Hf signatures, improving the robustness of the interpretation and better defining the sources.

Our results highlight surprising numbers of young zircons, and the Hf signature distinguishes zircons from the Andean, Gondwanides, Famatinian, Brasiliano, and Grenvillian cycles. We characterize grains restricted to the Andean cycle in South America and a drainage network that corroborates the supply of the passive margin by sediments from an active margin. Thus, the U-Pb ages of the detrital zircon obtained for samples from Barrier III and IV and the Hf data provide a strong argument for the main sediment contribution coming from the La Plata River drainage system during the Quaternary. This system has draining and eroding much of South America from the Andes to the Brazilian shield and feeding the littoral drift system that historically dominates toward the north in periods of the low sea. Also, the importance of coastal currents in grain transport is once again reaffirmed, with extreme importance for the contribution of distal sources in the construction of the Ti-Zr coastal deposits.

The zircon signature in the sands of southern Brazil confirms the fingerprint of an active margin imprinted on a passive margin and can be used as a signature in sediment transport studies in the Cenozoic and other basins formed in the past. In addition, the information presented provides a criterion to identify active or inactive orogeny on the continents, which also can be applied in the study of passive margins from the geological past.

Acknowledgments

We acknowledge the Brazilian Scholarship Agency (CAPES) for the first author's scholarship and the National Council for Scientific and Technological Development - CNPq for the financial support (grant #305053/2014-0 for F.C.J and #305393/2017-0 for S.R.D.). Rio Grande Mineração S.A. is thanked for supporting the fieldwork. Constructive comments and suggestions on the manuscript by Léo Afraneo Hartmann, are greatly appreciated.

References

- Bahlburg, H., Vervoort, J.D., Du Frane, S.A., Bock, B., Augustsson, C., Reimann, C., 2009. Timing of crust formation and recycling in accretionary orogens: Insights learned from the western margin of South America. *Earth-Science Reviews* 97, 215-241.
- Bahlburg, H., Vervoort, J.D., Du Frane, S.A., Carlotto, V., Reimann, C., Cárdenas, J., 2011. The U–Pb and Hf isotope evidence of detrital zircons of the Ordovician Ollantaytambo Formation, southern Peru, and the Ordovician provenance and paleogeography of southern Peru and northern Bolivia. *Journal of South American Earth Sciences* 32, 196-209.
- Balgord, E.A., 2017. Triassic to Neogene evolution of the south-central Andean arc determined by detrital zircon U-Pb and Hf analysis of Neuquén Basin strata, central Argentina (34° S–40° S). *Lithosphere* 9, 453-462.
- Barletta, R.C., Calliari, L.J., 2003. An assessment of the atmospheric and wave aspects determining beach morphodynamic characteristics along the central coast of RS state, southern Brazil. *Journal of Coastal Research*, 300-308.
- Barros, C.E., Nardi, L.V.S., Dillenburg, S.R., Ayup-Zouain, R.N., Jarvis, K., Baitelli, R., 2010. Detrital minerals of modern beach sediments in Southern Brazil: A provenance study based on the chemistry of zircon. *Journal of Coastal Research* 26, 80-93.
- Black, L.P., Kamo, S.L., Allen, C.M., Aleinikoff, J.N., Davis, D.W., Korsch, R.J., Foudoulis, C., 2003. TEMORA 1: A new zircon standard for Phanerozoic U-Pb geochronology. *Chemical geology* 200, 155-170.
- Canile, F.M., Babinski, M., Rocha-Campos, A.C., 2016. Evolution of the

- Carboniferous-Early Cretaceous units of Paraná Basin from provenance studies based on U-Pb, Hf and O isotopes from detrital zircons. *Gondwana Research* 40, 142-169.
- Carassai, J.J., Lavina, E.L.C., Chemale Jr., F., Girelli, T.J., 2019. Provenance of heavy minerals for the Quaternary coastal plain of southernmost Brazil (Rio Grande do sul State). *Journal of Coastal Research* 35, 295-304.
- Cawood, P.A., Hawkesworth, C.J., Dhuime, B., 2012. Detrital zircon record and tectonic setting. *Geology* 40, 875-878.
- Chemale Jr., F., 2000. Evolução Geológica do Escudo Sul-Riograndense. In: Holz, H., De Ros, L.F. (Eds.), *Geologia do Rio Grande do Sul*. CIGO/UFRGS, Porto Alegre, Brazil, pp.13-52 (in Portuguese).
- Chemale Jr., F., Lavina, E.L.C., Carassai, J.J., Girelli, T.J., Lana, C.C., 2021. Andean orogenic signature in the Quaternary sandy barriers of Southernmost Brazilian Passive Margin – Paradigm as a source area. *Geoscience Frontiers* 12, 101119. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2020.11.015>.
- Chu, N.C., Taylor, R.N., Chavagnac, V., Nesbitt, R.W., Boella, R.M., Milton, J.A., German, C.R., Bayon, G., Burton, K., 2002. Hf isotope ratio analysis using multi-collector inductively coupled plasma mass spectrometry: An evaluation of isobaric interference corrections. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry* 17, 1567-1574.
- Cordani, U.G., Ramos, V.A., Fraga, L.M., Cegarra, M., Delgado, I., Souza, K.G., Gomes, F.E.M., Schobbenhaus, C., 2016. Tectonic map of South America. Commission for the Geological Map of the World, Paris. doi: 10.14682/2016TEMSA.
- Corfu, F., Hancher, J.M., Hoskin, P.W.O., Kinny, P., 2003. Atlas of zircon textures. In: Hancher, J.M., Hoskin P.W.O. (Eds.), *Zircon*. Mineralogical Society of America, Washington, DC, pp. 469-500.
- Côrrea, I.C.S., Ayup-Zouain, R.N., Weschenfelder, J., Tomazelli, L.J., 2008. Áreas Fontes dos Minerais Pesados e sua Distribuição sobre a Plataforma Continental Sul-brasileira, Uruguia e Norte-argentina. *Pesquisas em Geociências* 35, 137-150 (in Portuguese with English abstract).
- Corrêa, I.C.S., Medeanic, S., Weschenfelder, J., Toldo Jr., E.E., Nunes, J.C., Baitelli, R., Santos, C.B., 2013. Registro sedimentario del antiguo canal de

desembocadura del Río de La Plata en la plataforma continental del sur de Brasil. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 30, 51-64 (in Espanhol with English abstract).

Delaney, P.J.V., 1965. *Fisiografia e Geologia de Superfície da Planície Costeira do Rio Grande do Sul* (Ph.D. thesis). Universidade de São Paulo, São Paulo, 127 pp (in Portuguese).

Dillenburg, S.R., Barboza, E.G., 2014. The strike-fed sandy coast of Southern Brazil. In: Martini, I.P., Wanless, H.R. (Eds.), *Sedimentary Coastal Zones from High to Low Latitudes: Similarities and Differences*. Geological Society, London, UK, pp. 333-352.

Dillenburg, S.R., Barboza, E.G., Rosa, M.L.C.C., Caron, F., Cancelli, R., Santos-Fischer, C.B., Lopes, R.P., Ritter, M.N., 2020. Sedimentary records of Marine Isotopic Stage 3 (MIS 3) in southern Brazil. *Geo-Marine Letters* 40, 1099-1108.

Dillenburg, S.R., Barboza, E.G., Tomazelli, L.J., Hesp, P.A., Clerot, L.C.P., Ayup-Zouain, R.N., 2009. The holocene coastal barriers of Rio Grande do Sul. In: Dillenburg, S.R., Hesp, P.A. (Eds.), *Geology and Geomorphology of Holocene Coastal Barriers of Brazil*. Springer, Berlin, Germany, pp. 53-91.

Dillenburg, S.R., Roy, P.S., Cowell, P.J., Tomazelli, L.J., 2000. Influence of antecedent topography on coastal evolution as tested by the shoreface translation-barrier model (STM). *Journal of Coastal Research* 16, 71-81.

Dillenburg, S.R., Tomazelli, L.J., Barboza, E.G., 2004. Barrier evolution and placer formation at Bujuru southern Brazil. *Marine Geology* 203, 43-56.

Ducea, M.N., Otamendi, J.E., Bergantz, G.W., Jianu, D., Petrescu, L., 2015. The origin and petrologic evolution of the Ordovician Famatinian-Puna arc. In: DeCelles, P.G., Ducea, M.N., Carrapa, B., Kapp, P.A. (Eds.), *Geodynamics of a Cordilleran Orogenic System: The Central Andes of Argentina and Northern Chile*. Geological Society of America Memoir 212, pp. 125-138.

Elias, S.J., 2016. *Mineralogy and provenance of the TiO₂ – ilmenite heavy mineral sand deposit of Nataka* (Masters dissertation). University of Cape Town, Cape Town, 123 pp.

Gerdes, A., Zeh, A., 2006. Combined U-Pb and Hf isotope LA-(MC-)ICP-MS analyses of detrital zircons: Comparison with SHRIMP and new constraints for the provenance and age of an Armorican metasediment in Central Germany.

Earth and Planetary Science Letters 249, 47-61

- Gruber, N.L.S., Correa, I.C.S., Nicolodi, J.L., Barboza, E.G., 2006. Morphodynamic limits of shoreface and inner shelf at the northern coast of Rio Grande do Sul, Brazil. *Journal of Coastal Research*, 664-668.
- Gruber, N.L.S., Toldo Jr., E.E., Barboza, E.G., Nicolodi, J.L., 2003. Equilibrium Beach and Shoreface Profile of the Rio Grande do Sul Coast - South of Brazil. *Journal of Coastal Research*, 253-259.
- Hamilton, N.T.M., 1995. Controls on the Global Distribution of Coastal Titanium-Zirconium Placers. *International Geology Review* 37, 755-779.
- Haschke, M.R., Scheuber, E., Günther, A., and Reutter, K.J., 2002, Evolutionary cycles during the Andean orogeny: Repeated slab breakoff and flat subduction?. *Terra Nova* 14, 49-55.
- Hawkesworth, C.J., Dhuime, B., Pietranik, A.B., Cawood, P.A., Kemp, A.I.S., Storey, C.D., 2010. The generation and evolution of the continental crust. *Journal of the Geological Society* 167, 229-248.
- Henderson, B., 2016. What do epsilon hafnium isotopic arrays tell us about Wilson cycle tectonics? Implications for the type area in the Appalachian-Variscan Orogen (Ph.D. thesis). University of Adelaide, Adelaide, 332 pp.
- Horstwood, M.S.A., Košler, J., Gehrels, G., Jackson, S.E., McLean, N.M., Paton, C., Pearson, N.J., Sircombe, K., Sylvester, P., Vermeesch, P., Bowring, J.F., Condon, D.J., Schoene, B., 2016. Community-Derived Standards for LA-ICP-MS U-(Th)-Pb Geochronology – Uncertainty Propagation, Age Interpretation and Data Reporting. *Geostandards and Geoanalytical Research* 40, 311-332.
- Ibanez-Mejia, M., Pullen, A., Arenstein, J., Gehrels, G.E., Valley, J., Ducea, M.N., Mora, A.R., Pecha, M., Ruiz, J., 2015. Unraveling crustal growth and reworking processes in complex zircons from orogenic lower-crust: The Proterozoic Putumayo Orogen of Amazonia. *Precambrian Research* 267, 285-310.
- Jaffey, A.H., Flynn, K.F., Glendenin, L.E., Bentley, W.C., Essling, A.M., 1971. Precision measurement of half-lives and specific activities of ^{235}U and ^{238}U . *Physical Review C* 4, 1889-1906.
- Kasper-Zubillaga, J.J., López, C.L., Muñoz, C.A.E.F., 2016. Provenance of opaque minerals in coastal sands, western Gulf of Mexico, Mexico. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana* 68, 323-338.

- Lopes, R.P., Ribeiro, A.M., Dillenburg, S.R., Schultz, C.L., 2013. Late middle to late Pleistocene paleoecology and paleoenvironments in the coastal plain of Rio Grande do Sul State, Southern Brazil, from stable isotopes in fossils of *Toxodon* and *Stegomastodon*. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 369, 385-394.
- Lorscheitter, M.L., Romero, E.J., 1985. Palynology of Quaternary sediments of the core T15, Rio Grande Cone, South Atlantic, Brazil. *Quaternary of South America and Antarctic Peninsula* 3, 55-92.
- Lovecchio, J.P., Rohais, S., Joseph, P., Bolatti, N.D., Ramos, V.A., 2020. Mesozoic rifting evolution of SW Gondwana: a poly-phased, subduction-related, extensional history responsible for basin formation along the Argentinean Atlantic margin. *Earth-Science Reviews* 203, 103138. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103138>.
- Martinho, C.T., Hesp, P.A., Dillenburg, S.R., 2010. Morphological and temporal variations of transgressive dunefields of the northern and mid-littoral Rio Grande do Sul coast, Southern Brazil. *Geomorphology* 117, 14-32.
- Melnick, D., Rosenau, M., Folguera, A., Echtler, H., 2006. Neogene tectonic evolution of the Neuquén Andes western flank (37-39°S). In: Kay, S.M., Ramos, V.A. (Eds.), *Evolution of an Andean Margin: A Tectonic and Magmatic View From the Andes to the Neuquén Basin (35°-39°S Lat.)*. Geological Society Of America Special Papers 407, pp. 73-95.
- Morel, M.L.A., Nebel, O., Nebel-Jacobsen, Y.J., Miller, J.S., Vroon, P.Z., 2008. Hafnium isotope characterization of the GJ-1 zircon reference material by solution and laser-ablation MC-ICPMS. *Chemical Geology* 255, 231-235.
- Motta, L.M., Toldo Jr., E.E., Almeida, L.E.S.B., Nunes, J.C., 2015. Sandy sediment budget of the midcoast of Rio Grande do Sul, Brazil. *Journal of Marine Research* 73, 49-69.
- Munaro, P., 1991. Relatório de avaliação das reservas geológicas de minerais pesados (Report). Paranapanema Minerações, São Paulo 12 pp. (in Portuguese).
- Munaro, P., 1994. Geologia e mineralogia do depósito de minerais pesados de Bojuru, RS (Masters dissertation). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 96 pp. (in Portuguese).

- Parise, C.K., Calliari, L.J., Krusche, N., 2009. Extreme storm surges in the south of Brazil: Atmospheric conditions and shore erosion. *Brazilian Journal of Oceanography* 57, 175-188.
- Patchett, P.J., Kouvo, O., Hedge, C.E., Tatsumoto, M., 1981. Evolution of continental crust and mantle heterogeneity: Evidence from Hf isotopes. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 78, 279-297.
- Pepper, M., Gehrels, G., Pullen, A., Ibanez-Mejia, M., Ward, K.M., Kapp, P., 2016. Magmatic history and crustal genesis of western South America: Constraints from U-Pb ages and Hf isotopes of detrital zircons in modern rivers. *Geosphere* 12, 1532-1555.
- Philander, C., Rozendaal, A., 2015. Detrital zircon geochemistry and U-Pb geochronology as an indicator of provenance of the Namakwa Sands heavy mineral deposit, west coast of South Africa. *Sedimentary Geology* 328, 1-16.
- Philipp, R.P., Pimentel, M.M., Chemale Jr., F., 2016. Tectonic evolution of the Dom Feliciano Belt in Southern Brazil: Geological relationships and U-Pb geochronology. *Brazilian Journal of Geology* 46, 83-104.
- Piola, A.R., Matano, R.P., Palma, E.D., Möller, O.O., Campos, E.J.D., 2005. The influence of the Plata River discharge on the western South Atlantic shelf. *Geophysical Research Letters* 32, L01603. doi:10.1029/2004GL021638.
- Potter, P.E., Szatmari, P., 2009. Global Miocene tectonics and the modern world. *Earth-Science Reviews* 96, 279-295.
- Potter, P.E., Szatmari, P., 2015. The global Middle and Late Miocene and the deep earth: Model for earlier orogenies. *Marine and Petroleum Geology* 68, 178-191.
- Ramos, V.A., 2008. The basement of the Central Andes: The arequipa and related terranes. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 36, 289-324.
- Ramos, V.A., 2009. Anatomy and global context of the Andes: Main geologic features and the Andean orogenic cycle. In: Kay, S.M., Ramos, V.A., Dickinson, W.R. (Eds.), *Backbone of the Americas: Shallow Subduction, Plateau Uplift, and Ridge and Terrane Collision*. Geological Society of America Memoir 204, 31-65.
- Ramos, V.A., Chemale Jr., F., Naipauer, M., Pazos, P.J., 2014a. A provenance study of the Paleozoic Ventania System (Argentina): Transient complex sources from Western and Eastern Gondwana. *Gondwana Research* 26, 719-740.
- Ramos, V.A., Litvak, V.D., Folguera, A., Spagnuolo, M., 2014b. An Andean tectonic

- cycle: From crustal thickening to extension in a thin crust (34°–37°SL). *Geoscience Frontiers* 5, 351-367.
- Reid, A.J., Keeling, J.L., Belousova, E.A., 2013. Hf isotopic investigation into the provenance of zircons in heavy mineral sands of the Eucla Basin. *Mines and Energy South Australia Journal* 68, 17-24.
- Rocha, J.M., Milliman, J.D., Santana, C.I., Vicalvi, M.A., 1975. Upper continental margin sedimentation off Brazil. In: Milliman, J.D., Summerhayes, C.P. (Eds.), *Contributions to Sedimentology*. Schweizerbart Science Publishers, Stuttgart, Germany, pp. 117-150.
- Rosa, M.L.C.C., Barboza, E.G., Abreu, V.S., Tomazelli, L.J., Dillenburg, S.R., 2017. High-Frequency Sequences in the Quaternary of Pelotas Basin (coastal plain): A record of degradational stacking as a function of longer-Term base-level fall. *Brazilian Journal of Geology* 47, 183-207.
- Rosa, M.L.C.C., Tomazelli, L.J., Costa, A.F.U., Barboza, E.G., 2009. Integração de métodos potenciais (gravimetria e magnetometria) na caracterização do embasamento da região sudoeste da bacia de pelotas, Sul do Brasil. *Revista Brasileira de Geofísica* 27, 641-657 (in Portuguese with English abstract).
- Santos, M.M., Lana, C.C., Scholz, R., Buick, I., Schmitz, M.D., Kamo, S.L., Gerdes, A., Corfu, F., Tapster, S., Lancaster, P., Storey, C.D., Basei, M.A.S., Tohver, E., Alkmim, A., Nalini, H., Krambrock, K., Fantini, C., Wiedenbeck, M., 2017. A New Appraisal of Sri Lankan BB Zircon as a Reference Material for LA-ICP-MS U-Pb Geochronology and Lu-Hf Isotope Tracing. *Geostandards and Geoanalytical Research* 41, 335-358.
- Silva, M.A.M., 1979. Provenance of heavy minerals in beach sands, southeastern Brazil: from Rio Grande to Chui (Rio Grande do Sul State). *Sedimentary Geology* 24, 133-148.
- Sláma, J., Košler, J., Condon, D.J., Crowley, J.L., Gerdes, A., Hanchar, J.M., Horstwood, M.S.A., Morris, G.A., Nasdala, L., Norberg, N., Schaltegger, U., Schoene, B., Tubrett, M.N., Whitehouse, M.J., 2008. Plešovice zircon - A new natural reference material for U-Pb and Hf isotopic microanalysis. *Chemical Geology* 249, 1-35.
- Söderlund, U., Patchett, P.J., Vervoort, J.D., Isachsen, C.E., 2004. The ^{176}Lu decay constant determined by Lu-Hf and U-Pb isotope systematics of Precambrian

- mafic intrusions. *Earth and Planetary Science Letters* 219, 311-324.
- Stacey, J.S., Kramers, J.D., 1975. Approximation of terrestrial lead isotope evolution by a two-stage model. *Earth and Planetary Science Letters* 26, 207-221.
- Stanaway, K.J., 2005. Four World Titanium Mining Provinces. *Heavy Minerals Conference Proceedings*, Jacksonville, FL, pp. 47-59.
- Tapia-Fernandez, H.J., Armstrong-Altrin, J.S., Selvaraj, K., 2017. Geochemistry and U-Pb geochronology of detrital zircons in the Brujas beach sands, Campeche, Southwestern Gulf of Mexico, Mexico. *Journal of South American Earth Sciences* 76, 346-361.
- Tapias, J.G., Schobbenhaus, C., Ramírez, N.E.M., 2019. Geological map of South America. Commission for the Geological Map of the World. <https://rigeo.cprm.gov.br/handle/doc/21606>.
- Tedesco, J., Cagliari, J., Chemale Jr., F., Girelli, T.J., Lana, C.C., 2019. Provenance and paleogeography of the Southern Paraná Basin: Geochemistry and UPb zircon geochronology of the Carboniferous-Permian transition. *Sedimentary Geology* 393, 105539. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2019.105539>.
- Toldo Jr., E.E., Almeida, L.E.S.B., Nicolodi, J.L., Martins, L.R., 2005. Retração e Progradação da Zona Costeira do Estado do Rio Grande do Sul. *Gravel* 3, 31-38 (in Portuguese with English abstract).
- Toldo Jr., E.E., Nicolodi, J.L., Almeida, L.E.S.B., Corrêa, I.C.S., Esteves, L.S., 2006. Coastal Dunes and Shoreface Width as a Function of Longshore Transport. *Journal of Coastal Research*, 390-394.
- Tomazelli, L.J., Villwock, J.A., 1996. Quaternary geological evolution of Rio Grande do Sul Coastal Plain, Southern Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências* 68, 373-382.
- Tomazelli, L.J., 1978. Minerais Pesados da Plataforma Continental do Rio Grande do Sul. *Acta Geológica Leopoldensia* 2, 103-159 (in Portuguese).
- Tomazelli, L.J., Dillenburg, S.R., Villwock, J.A., 2000. Late Quaternary Geological History of Rio Grande Do Sul Coastal Plain, Southern Brazil. *Revista Brasileira de Geociências* 30, 474-476.
- Tomazelli, L.J., Villwock, J.A., Dillenburg, S.R., Bachi, F.A., Dehnhardt, B.A., 1998. Significance of Present-Day Coastal Erosion and Marine Transgression, Rio Grande do Sul, Southern Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências* 70,

220-229.

- Urien, C.M., Ewing, M., 1974. Recent Sediments and Environment of Southern Brazil, Uruguay, Buenos Aires, and Rio Negro Continental Shelf. In: Burk, C.A., Drake, C.L. (Eds.), *The Geology of Continental Margins*. Springer, Berlin, Germany, pp. 157-177.
- Van Achterbergh, E., Ryan, C.G., Griffin, W.L., 2001. Data reduction software for LA-ICP-MS. In: Sylvester, P. (Ed.), *Laser Ablation ICPMS in the Earth Science*. Mineralogical Association of Canada, pp. 239-243.
- Verma, S.P., Armstrong-Altrin, J.S., 2016. Geochemical discrimination of siliciclastic sediments from active and passive margin settings. *Sedimentary Geology* 332, 1-12.
- Vermeesch, P., 2018. IsoplotR: A free and open toolbox for geochronology. *Geoscience Frontiers* 9, 1479-1493.
- Villwock, J.A., Tomazelli, L.J., 1995. *Geologia Costeira do Rio Grande do Sul*. Notas Técnicas do CECO-IG-UFRGS 8. Porto Alegre, pp. 1-45 (in Portuguese).
- Villwock, J.A., Tomazelli, L.J., Loss, E.L., Dehnhardt, E.A., Horn Filho, N.O., Bachi, F.A., Dehnhardt, B.A., 1986. Geology of the Rio Grande do Sul Coastal Province. In: Rabassa, J. (Ed.). *Quaternary of South America and Antarctic Peninsula*. CRC Press, London, UK, pp. 79-97.
- Woodhead, J.D., Hergt, J.M., 2005. A preliminary appraisal of seven natural zircon reference materials for in situ Hf isotope determination. *Geostandards and Geoanalytical Research* 29, 183-195.
- Wust, C.F., 2021. *Caracterização química da mineralização de ilmenita da região de São José do Norte, litoral do RS* (Masters dissertation). Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 54 pp (in Portuguese with English manuscript).

ANEXO 1

Materiais Suplementares do artigo “*Andean fingerprint on placer sands from the southern Brazilian coast*”, submetido à revista *Sedimentary Geology*. Contém 3 documentos:

- a) Supplementary Table S1.xlsx
- b) Supplementary Table S2.xlsx
- c) Supplementary Table S3.xlsx

Download – arquivo compactado (2,48 MB)

<https://drive.google.com/drive/folders/1hhLNyqT5jn2JiU1HZpwop2wwwraC-naR?usp=sharing>

ANEXO 2

Resumo intitulado “*Análise de proveniência do depósito de placer de Retiro, São José do Norte/RS*”, em coautoria com Farid Chemale Junior, Sérgio Rebello Dillenburg, Lucy Takehara Chemale e Tiago Jonathan Girelli, apresentado em 2019 no XVII Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário (ABEQUA).



ANÁLISE DE PROVENIÊNCIA DO DEPÓSITO DE *PLACER* DE RETIRO, SÃO JOSÉ DO NORTE/RS

Monique Aparecida Marchese Rizzi ¹; Farid Chemale Junior ²; Sergio Rebello Dillenburg ³; Lucy Takehara Chemale ⁴; Tiago Jonatan Girelli ².

¹ Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geociências, Porto Alegre-RS, Brasil.

² Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Geologia, São Leopoldo-RS, Brasil.

³ Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Geociências, Centro de Estudos de Geologia Costeira e Oceânica.

⁴ CPRM – Serviço Geológico do Brasil, Superintendência de Porto Alegre (RS).

Minerais pesados são minerais detríticos, de peso específico maior que 2,85 g/cm³, cuja fração ocorrente em um determinado local é subordinada à abundância da área fonte, aos processos de transporte e a capacidade de resistência dos minerais. Formado no Sistema Laguna-Barreira IV da Planície Costeira do Rio Grande do Sul, o depósito de Retiro constitui um *placer* enriquecido em minerais pesados de titânio, localizado a norte da desembocadura da Laguna dos Patos, no município de São José do Norte. Considerando a relação entre a evolução das barreiras costeiras durante o Holoceno tardio na costa sul brasileira e a formação do depósito de *placer*, buscou-se por meio da análise sedimentológica dos minerais pesados e datação de zircão por U-Pb via LA-HR-SF-ICP-MS estabelecer a proveniência dos minerais pesados do depósito de Retiro. Os resultados indicam um grande aporte sedimentar provindo do sistema de drenagens do Rio de La Plata, visto que 9% do total dos zircões analisados possuem idades muito jovens, inferiores a 50 Ma e, portanto, restritas ao intervalo tectônico Andino. Entretanto, minerais menos resistentes que o zircão, como anfíbólio e cianita, denotam uma contribuição de fontes proximais, pois não suportariam as condições de transporte e retrabalhamento por longas distâncias. Assim, considera-se duas fontes distintas alimentando o sistema de barreiras costeiras quaternárias no local do estudo: uma fonte distal, responsável por grande parte da contribuição mineralógica na formação do *placer* de Retiro, associada a bacia de drenagem do Rio de La Plata, que drena a metade norte da Bacia do Paraná e da fronteira andina; e uma fonte proximal, de alimentação direta, associada aos rios Camaquã, Jacuí e Cebolatti, representando contribuições do Escudo Sul-Rio-Grandense e da Bacia do Paraná.

Palavras-Chave: Depósito de *Placer*; Idades U-Pb de Zircão Detrítico; Planície Costeira do Rio Grande do Sul; Proveniência.

ANEXO 3

Resumo intitulado “*Caracterização e distribuição de minerais pesados nos municípios de Cassino e São José do Norte (RS) – Barreiras III e IV da Planície Costeira do Rio Grande do Sul*”, em coautoria com Lucy Takehara, Sérgio Rebello Dillenburg, Farid Chemale Junior e Cássia Fatima Wust, apresentado e publicado na 1ª Edição dos Anais do II Simpósio Brasileiro de Geologia e Geofísica Marinha (II SBGGM) em 2019.



II Simpósio Brasileiro de Geologia e Geofísica Marinha (II SBGGM)

50ª Reunião Anual do Programa de Geologia e Geofísica Marinha (PGGM)

4º Workshop International Ocean Drilling Program (IODP / CAPES)

2º Workshop de Hidrografia Portuária e Petrolífera

4º Workshop de Geologia e Geofísica Marinha

II SBGGM



CARACTERIZAÇÃO E DISTRIBUIÇÃO DE MINERAIS PESADOS NOS MUNICÍPIOS DE CASSINO E SÃO JOSÉ DO NORTE (RS) – BARREIRAS III E IV DA PLANÍCIE COSTEIRA DO RIO GRANDE DO SUL

RIZZI, M.A.M¹; TAKEHARA, L.²; DILLENBURG, S.R.¹; CHEMALE JR, F.³; WUST, C.F.³

Universidade Federal do Rio Grande do Sul¹ (Monique Aparecida Marchese Rizzi, mmonique.rizzi@gmail.com); Serviço Geológico do Brasil - CPRM²; Universidade do Vale do Rio dos Sinos³

Elevadas concentrações de minerais pesados em depósitos marinho-costeiros emersos podem formar depósitos economicamente viáveis, conhecidos como placeres. Localizado na Planície Costeira do Rio Grande do Sul, o município de São José do Norte abriga um grande depósito de minerais pesados disseminados, dividido em três setores distintos (Bojuru, Estreito/Capão do Meio e Retiro) e relacionado diretamente à formação da Barreira IV. Buscando definir a distribuição dos minerais pesados na região e elucidar os processos de retrabalhamento e concentração de minério no setor Retiro, foram coletadas dezesseis amostras, com volumes de 2.356 cm³, distribuídas no *placer* e em áreas adjacentes, incluindo a Barreira III, nos municípios de Cassino e São José do Norte. As amostras foram concentradas por meio de bateia e bromofórmio ($\rho = 2,89 \text{ g/cm}^3$ a 25°C), pesadas, e fracionadas com uso do separador isodinâmico Frantz L-1 em diferentes intervalos de susceptibilidade magnética. A partir das frações obtidas, verificou-se a tipologia dos grãos e suas características. As amostras coletadas, de modo geral, são formadas por grãos muito finos ($\leq 0,1 \text{ mm}$), bem arredondados e altamente maduros, indicando um longo processo de transporte e retrabalhamento, também associado as reciclagens das barreiras mais antigas. No conjunto, os minerais opacos são mais densos e mais finos que os minerais translúcidos, corroborando para sua concentração e formação do *placer*. Todas as amostras apresentaram a mesma composição mineralógica, diferindo apenas nos teores de cada grupo mineral, sendo: magnetita, hematita, titano-magnetita, ilmenita (o mais abundante), leucoxênio, granada, turmalina, epidoto, anfibólio, estauroлита, zircão, rutilo, cianita, monazita e fragmentos líticos. Destes, ilmenita, rutilo e zircão são os minerais de minério. Todavia, dentre as amostras analisadas, a coletada em Cassino apresentou-se como a mais divergente do conjunto: possui um dos menores volumes de minerais pesados, com a menor concentração de ilmenita e baixas concentrações de zircão e rutilo, sendo composta majoritariamente por minerais não-magnéticos e não econômicos. A grande disparidade verificada entre a assembleia mineral de Cassino em relação as amostras de São José do Norte, condiz a processos sedimentares diferenciados para os locais, onde a característica erosiva da Praia do Mar Grosso (São José do Norte), combinada a evolução geomorfológica da área, contribuem para a formação do depósito de *placer*. A amostra coletada para a Barreira III, em São José do Norte, não conferiu um potencial econômico, visto que o volume obtido de minerais pesados foi inferior a 1% do total de sedimentos analisados. As amostras coletadas na Barreira IV em São José do Norte, apresentaram assembleia de pesados muito semelhantes em todas as amostras. Entretanto, um aumento gradativo na concentração de minerais pesados em direção ao norte para sedimentos coletados em *backshore* na Barreira IV, e diferenças significativas dos volumes de pesados entre amostras muito próximas coletadas sobre domínio eólico, demonstram um depósito com uma distribuição heterogênea, com diferenças cumulativas laterais e transversais do minério controlados pelo regime de sedimentação.

Palavras-chave: Minerais pesados. Depósito de *Placer*. Planície Costeira do Rio Grande do Sul.

ANEXO 4

Resumo intitulado “*Sensoriamento remoto aplicado ao reconhecimento de elementos arquiteturais constituintes de um depósito de minerais pesados na Planície Costeira do Rio Grande do Sul*”, em coautoria com Maria Luiza Correa da Camara Rosa e Sérgio Rebello Dillenburg, apresentado e publicado em 2019 nos Anais da 3ª Semana Acadêmica dos Pós-Graduandos do Instituto de Geociências (SAPIGEO): Ensino, Pesquisa, Extensão & Resistência.

SENSORIAMENTO REMOTO APLICADO AO RECONHECIMENTO DE ELEMENTOS ARQUITETURAIS CONSTITUINTES DE UM DEPÓSITO DE MINERAIS PESADOS NA PLANÍCIE COSTEIRA DO RIO GRANDE DO SUL

Rizzi, M.A.M.¹; Rosa, M.L.C.C.²; Dillenburg, S.R.²

¹- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geociências, Porto Alegre-RS, Brasil; ²- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Geociências, Centro de Estudos de Geologia Costeira e Oceânica.

Resumo: Minerais pesados, assim denominados devido a sua alta densidade ($> 2,85 \text{ g/cm}^3$), podem formar depósitos de grande valor econômico agregado, conhecidos como *placers*, uma vez acumulados no ambiente sedimentar através de concentração mecânica. Em São José do Norte (RS), um grande sítio de minerais pesados disseminados, formado durante o Holoceno e enriquecido em minerais de titânio, destaca-se entre os depósitos emersos na Planície Costeira do Rio Grande do Sul. Com largura que varia de 1 km a 4 km e espessura de 1 m a 5 m, constitui-se de um depósito contido em campos de dunas transgressivas, as quais abrigam a maior proporção do minério e, em menor escala, nas áreas de *backshore* e *foreshore*. Considerando a importância desses elementos arquiteturais do sistema deposicional costeiro para a concentração do minério no local, verificou-se a necessidade do mapeamento dessas feições. Dessa forma, através de ferramentas de geoprocessamento e de produtos de sensoriamento remoto, realizou-se a identificação e a classificação supervisionada da cobertura da área estudada. A análise foi feita por meio de uma imagem multiespectral do satélite Landsat7, sensor ETM+, através do *software* ArcMap 10.5.1, numa escala de mapeamento 1:70.000. O processo constituiu-se de uma interpretação visual, com a vetorização manual de unidades de cobertura, que serviram como amostras de treinamento, a partir das quais foram estabelecidas as assinaturas espectrais das classes. A classificação automática permite a definição temática da cobertura de grandes áreas, possibilitando a identificação de unidades potencialmente despercebidas na interpretação visual. O método de classificação automática utilizado foi o de Máxima Verossimilhança, posteriormente corrigido pela aplicação do filtro “*Majority Filter*”. A análise qualitativa da correspondência entre os elementos vetorizados e a classificação automática indicou uma correspondência geral das classes delimitadas. Considerando a geologia, foi possível identificar depósitos de caráter lagunar e depósitos da barreira costeira. Contudo, ao aplicar a ferramenta de classificação utilizando apenas a imagem óptica, não é possível distinguir diferentes sistemas de barreiras presentes na região (Barreira Pleistocênica da Holocênica). Para corrigir esse fator, combinou-se a imagem ao modelo digital de elevação de terreno (SRTM), dados de declividade e hidrografia (como a orientação das vertentes, por exemplo). Por fim, os resultados obtidos foram comparados ao mapa geológico existente. Como a barreira mais antiga foi retrabalhada na construção da barreira atual, essa poderá apresentar potencialidade econômica, proporcionando a ampliação da área do depósito conhecido. Ao comparar o polígono da área outorgada pela empresa que possui os direitos minerários, observa-se uma forte correspondência entre o campo de dunas mapeado com a área outorgada, que se ajusta também sobre a zona praias conforme uma curvatura que surge no sentido norte na linha de costa. Nesta porção, a acumulação de minerais pesados na zona *foreshore-backshore* é potencializada, uma vez que a energia de ondas conhecida para a região aumenta em relação ao sul da área, favorecendo o fracionamento hidráulico entre os minerais leves e pesados no depósito de *placer*.

Palavras-chave: *Sensoriamento remoto, Depósito de placer, Planície Costeira do Rio Grande do Sul.*

ANEXO 5

Resumo intitulado “*U-Pb and Lu-Hf isotopes applied to the provenance studies of the Ti-bearing placers in the Rio Grande do Sul Coastal Plain*”, em coautoria com Farid Chemale Junior, Sérgio Rebelo Dillenburg, Lucy Takehara, Tiago Jonatan Girelli e Cássia Fatima Wus, publicado em 2020 na 1ª Edição dos Anais dos Workshops do PGGM – Edição Amazônica.



Workshops do PGGM – Edição Amazônica
 51ª Reunião Anual do Programa de Geologia e Geofísica Marinha (PGGM)
 5º Workshop de Geologia e Geofísica Marinha
 3º Workshop de Hidrografia Portuária e Petrolífera
 1º Workshop de Sistemas Costeiros Amazônicos
 Workshop de Oceano Profundo



U-Pb AND Lu-Hf ISOTOPES APPLIED TO THE PROVENANCE STUDIES OF THE TI-BEARING PLACERS IN THE RIO GRANDE DO SUL COASTAL PLAIN

RIZZI, M.A.M.¹; CHEMALE JR., F.²; DILLENBURG, S.R.¹; TAKEHARA, L.³;
 GIRELLI, T.J.²; WUST, C.F.²

Universidade Federal do Rio Grande do Sul¹ (Monique Aparecida Marchese Rizzi, mmonique.rizzi@gmail.com); Universidade do Vale do Rio dos Sinos²; Serviço Geológico do Brasil³

Formed through the mechanical concentration of heavy minerals in a sedimentary environment, beach placers can constitute deposits of great added economic value. In São José do Norte (RS), a world-class Ti-bearing placer was formed during the late Holocene. It is well known a relationship between placer formation and the evolution of coastal barriers in southern Brazil during the late Holocene. But there is still a debate in regard of the primary source of the heavy minerals. Thus, this research has focused on the study of these heavy minerals provenance. With this purpose eight sand size samples were collected at the backshore zone of beaches located between Cassino and São José do Norte. After laboratory processes of heavy minerals concentration, zircons were separated with the aim of geochronology analysis by U-Pb and Lu-Hf isotopes via LA-ICP-MS. The U-Pb age pattern distribution of the analyzed zircon samples was grouped in the different tectonic intervals of South America, such as Andean, Late to Post Gondwanides-Andean, Gondwanides, Famatinian, Pampean, and the Neoproterozoic, Mesoproterozoic, Paleoproterozoic and Archean cycles. Of these, 35.7% of the total analyzed grains belong to the Neoproterozoic period, which covers the Brasiliano cycle. However, 9% of the total zircons analyzed (up to 12% in some samples) correspond grains younger than 50 Ma., restricted to the Andean interval in southern South America. The Lu-Hf detrital zircon analyzes point out at least two distinct groups. One with very young ages (around 50 Ma. - Andean cycle) and positive $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ trends that demonstrate a contribution of a depleted mantle. And another one aged about 250 Ma. and negative $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$, showing crucial crustal recycling, interpreted as Late to Post Gondwanides cycle. Older zircons (500 to 800 Ma. old) display negative $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ values and, therefore, lesser radiogenic and larger crustal contribution. These zircon grains came from a recycled magmatic arc of the Brasiliano cycle. The U-Pb data integrated with the Lu-Hf isotopic data provided clue information on the different sources that fed the coastal barrier system of southern Brazil during the Holocene. The Andean source in the heavy mineral deposits is ubiquitous information for the distal sediment contribution of the Rio de La Plata system since its tributaries transport also material from the Andean mountains. The proximal drainage systems, such as the Camaquã, Jacuí, and Cebolatti rivers, fed mainly sediments eroded from the South-Rio-Grandense Shield.

Palavras-chave: U-Pb and Lu-Hf isotopes. Provenace. Rio Grande do Sul Coastal Plain.

ANEXO I

Título da Dissertação/Tese:

“Isótopos U-Pb-Hf de zircões detríticos aplicados ao estudo de proveniência do placer costeiro de São José do Norte, Rio Grande do Sul, Brasil”

Área de Concentração: Geologia Marinha

Autor: **MONIQUE APARECIDA MARCHESE RIZZI**

Orientador: Prof. Dr. Sergio Rebello Dillenburg

Examinador: Prof. Dr. Paulo César Fonseca Giannini

Data: 04/10/2021

Conceito: A

PARECER:

A dissertação consiste em um estudo de proveniência dos minerais pesados do plácer costeiro de São José do Norte (RS), com destaque para resultados de análises isotópicas de U-Pb e Lu-Hf por LA-ICP-MS, aplicada a 866 grãos de zircão extraídos de 17 amostras coletadas nas barreiras III e IV. A presença significativa (cerca de 10%) de grãos mais jovens que 50 Ma e de uma assinatura Hf, dentre outras quatro, compatível com o orógeno andino, é interpretada pela autora como registro da influência de sedimentos distais do rio de La Plata, trazidos, via deriva litorânea, de sul para norte. Os sedimentos proximais fornecidos pelas drenagens locais, por sua vez, seriam oriundos do Escudo Uruguaio-Sul-Riograndense e de sua cobertura, representada sobretudo pelas rochas sedimentares da Bacia do Paraná.

A assembleia de minerais pesados em si recebe relativa pouca atenção, mas os resultados e discussões que a autora consegue extrair da datação e estudo isotópico do zircão mostram-se mais que suficientes para se chegar a um trabalho de alta qualidade, em nível até ligeiramente acima do esperado para o mestrado.

A dissertação é em geral clara e objetiva, estando fundamentada em bibliografia pertinente e atualizada. Os argumentos são bem encadeados e convincentes. A mestranda soube aliar, com rara felicidade, o conhecimento sobre a dinâmica sedimentar holocena da costa sul-riograndense e a aplicação de métodos de análise de proveniência de última geração. O resultado é um trabalho extremamente original e importante para as áreas de conhecimento envolvidas e digno de uma ou mais publicações em revistas internacionais de impacto. De fato, o documento inclui um artigo submetido à revista *Sedimentary Geology*, além de quatro resumos apresentados em eventos.

As dúvidas e sugestões de pequenos aprimoramentos que se apresentam a seguir são, na grande maioria, ligadas a questões pontuais de apresentação formal, que pouco ou nada afetam a qualidade do conteúdo do trabalho.

- Por norma da IMA (*International Mineralogical Association*), nomes de minerais que não se referem a grupos (como feldspatos, piroxênios e anfibólios) não se flexionam para o plural. Desse modo, recomenda-se redigir “zircão”, sempre no singular (por exemplo, o zircão, grãos de zircão, cristais de zircão).

- *Placer* é palavra estrangeira e portanto deve, idealmente, ser grafada em itálico; ou aportuguesa para *plácer*, com acento.
- Na maioria dos seus usos ao longo da dissertação e dos artigos anexos, o termo “ambiente/environment” pode ser eliminado, sem prejuízo da compreensão, ou ser substituído por termos mais específicos e precisos.
- Na p.16, não está claro o que quer dizer com “zircão, altamente refratário”. Refratário em que sentido? Sugere-se reformular a redação.
- Para as referências a elementos químicos, o formato (nome por extenso ou símbolo químico) está variando ao longo do documento. Melhor adotar um só padrão.
- Na p.17, citar fontes bibliográficas sobre o rumo da deriva litorânea resultante para NE, na PCRS.
- Nomes de unidades cronogeológicas, quando adjetivados (holocênica, quaternária, pré-cambriana, paleozoica etc; e.g. p.17, 21) grafam-se em português com iniciais minúsculas, diferentemente da regra em inglês.
- Em todos os seus usos ao longo do texto, a palavra “metodologia” refere-se à descrição de métodos e não à discussão crítica desses métodos. Recomenda-se, portanto, substituir por método(s), simplesmente.
- Na p.18, a redação “depósito de *placer* mundialmente econômico” não está precisa. Idem com “world economic value”, na p.58. Melhor dizer “depósito de classe mundial”, como adotado em várias outras passagens (p.6, 16, 17 etc).
- Na p.18, a afirmativa de que “a área ... geologicamente corresponde aos depósitos arenosos da barreira costeira do Sistema Depositional Laguna-Barreira IV”, por mais consagrada que seja a ideia, requer citação de fontes bibliográficas.
- Na legenda das figuras 1 (p.19) e 2 (p.61), padronizar critérios para uso de iniciais maiúsculas x minúsculas (para “barrier” e “system”).
- Na p.21, substituir “uma costa ligeiramente ondulada” por “linha de costa ligeiramente ondulada”, para deixar claro o sentido 2D, em planta, da afirmativa.
- Na mesma página, os “grandes corpos lacustres” que “se inserem ao sul e na porção central” são lacustres de fato, *sensu stricto*, ou são lagunares?
- Na p. 21, consta “As idades dos Sistemas I a IV foram sugeridas pela primeira vez por Villwock e Tomazelli (1995), baseadas na curva dos estágios isotópicos de oxigênio (Shackleton & Opdyke, 1973; Imbrie *et al.*, 1984), os quais foram interpretados como representantes dos períodos de nível de mar alto”. Na redação adotada, “os quais” parece concordar com os estágios. Sugere-se reformular a redação, para evitar dubiedade e mal entendimento (de que os estágios isotópicos marinhos, em geral, sejam todos de mar alto); e grafar “sistemas I a IV”, com iniciais minúsculas, como é a regra em português para nomes próprios no plural.
- Ainda na p.21, sobre os registros no Sul do Brasil de um nível de mar alto no estágio MIS 3, com idade média de 42 ka, especificar se esses registros são emersos ou submersos.
- Na p.22, substituir “microtidal” (anglicismo) por “micromareal” e grafar *swell* em itálico. Nesta mesma passagem, sobre os dados de altura e azimute de ondas, consultar também Pianca et al. (2010). Idem p.60.
- Na p.23, legenda da Figura 4, mudar redação para “máximo nível relativo do mar”.
- Na p.24, par.1, substituir gradacional por agradacional.
- No mesmo parágrafo, rever a redação “As transições ocorrem gradacionalmente”. O termo “gradacional” não existe. O que existe é “gradual”. Porém, “transição gradual” ficaria algo redundante. Sugere-se então “passagens graduais” ou “passagens transicionais”.
- Evitar artigos indefinidos desnecessários, por exemplo no início do par.3 da p.24.

Esses artigos transmitem falsa ideia de imprecisão.

- Na referência a “altas concentrações de minerais pesados (até 30%)” (p.24, par.3 e p.62), indicar se essas concentrações estimadas são em massa ou em volume.

- Na p.25, onde se afirma que zircão pode ser formado “através de cristalização magmática ou processos metamórficos de temperatura moderada a alta”, indicar *range* de temperaturas entre parêntesis. Caso contrário, a redação fica subjetiva.

- Na p.26, a afirmativa de que “dentre os minerais pesados, o zircão ($\gamma = 4,66 \text{ gm/cm}^3$) não é afetado pelos processos de fracionamento do ciclo sedimentar”, não está precisa e requer reformulação na redação. A rigor, zircão pode ser afetado por fracionamento (e.g. enriquecimento em fácies proximais e empobrecimento em distais) via seleção hidráulica.

- Evitar uso de advérbios “abaixo” ou “acima”, para indicar posição de quadro, tabela ou figura (por ex., chamada do Quadro 1 na p.30).

- Na p.33, reposicionar parêntesis da citação: segundo Iizuka *et al.* (2017).

- Nomes de bacias sedimentares, enquanto entidades estratigráficas, devem ser grafados com iniciais maiúsculas: Bacia de Pelotas (p.36).

- “Areia fina” é uma classe granulométrica específica. Foi de fato a ela que se quis dizer com o uso desta expressão na primeira linha do Quadro 2 (p.37)? Ou a ideia foi falar simplesmente de “sedimentos”?

- Para grafia de numerais com sentido de contagem, a norma editorial mais usual é escrever por extenso para quantidades menores ou iguais a 10 (ex.: dez amostras) e em algarismos arábicos para quantidades maiores (ex.: 16 amostras). Sugere-se adotar isso (e.g. p 37 e 39).

- No mapa da Figura 9, p.39, está difícil distinguir os vários tons de rosa da legenda. Verificar se não é possível usar mais cores.

- Na legenda da Figura 10, p.39, como se sabe que se trata de sedimentos (paleo)praias (e não eólicos costeiros, por exemplo)? Que estruturas sedimentares foram encontradas? Foi feita análise de fácies? Sente-se falta dessa descrição de campo, na coleta.

- Em relação à separação de minerais leves e pesados, descrita na p.39, ela foi feita em amostra total (*bulk*)? Ou houve fracionamento granulométrico prévio? Mesmo que não tenha havido esse fracionamento granulométrico, é recomendável deixar essa informação mais explícita.

- Na p. 40, o que se quer dizer com “características petrográficas” das assembleias minerais, por lupa binocular? “Petrográfica” refere-se à descrição de rocha. Neste caso, não seriam características texturais (arredondamento, forma, corrosão, sulcamento de clivagem, impregnação etc)? Ou cristalográficas (fratura, clivagem, geminação) e texturais?

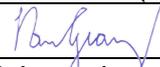
- Ainda na p. 40, sobre os minerais identificados nas frações separadas ao Frantz: considerando que a identificação à lupa tem uma margem de erro considerável, foi feita conferência desta identificação por algum outro método, como microscopia óptica de luz polarizada e/ou DRX?

- Na p.44, item 1.7, afirma-se que “as idades U-Pb do zircão detrítico obtidas para amostras da Barreira III e IV e os dados de Hf fornecem um forte argumento para a principal contribuição provinda do sistema de drenagens do Rio de La Plata, alimentando a deriva litorânea para o norte em períodos de mar baixo.”

Concordo que os tratos de mar baixo possam ter favorecido a influência do rio de La Plata. Mas, não poderia ter existido essa influência também nos de mar alto, já que pelo menos a pluma desse rio, hoje, chega até o Cabo de Santa Marta? Talvez este seja um ponto interessante para incluir na discussão da dissertação e/ou do artigo.

- p.57, par.2: É “deposit enriched with titanium minerals” ou rich in titanium minerals? “Enriched” dá ideia de atuação de processo de enriquecimento é, portanto, é uma redação mais específica e interpretativa.
- Na p.60, onde se lê “Most of the sediment load transported by rivers is retained in lagoons and other coastal environments...” esta última expressão parece vaga. Sugere-se cortar ou especificar mais.
- Na p.61, substituir “Holocenic barrier” por “Holocene barrier”.
- Na p.62, leucoxênio é incluído como um mineral da assembleia, ao lado de ilmenita, zircão, epidoto etc. A rigor, porém, o termo leucoxênio não se refere a um mineral específico formal (certificado pela IMA), mas é apenas designação genérica para agregados criptocristalinos de óxi-hidróxidos e/ou outros compostos de Ti (e.g. anatásio, rutilo, titanita), à semelhança do que se tem com compostos de Fe⁺³ no caso da limonita. Sugere-se, portanto, mudar ligeiramente a redação
- Na p.62, na passagem: “These grains are well selected and moderately to well rounded, with average grain sizes ranging from 0.062 to 0.105 mm (very fine sand), smaller than the quartz grains that make up the transgressive dunes (0.150 to 0.210 mm - fine sand)”, sugere-se mudar a redação para: The granulometry of these grains is well sorted, with mean (modal????) size ranging from 0.062 to 0.105 mm (very fine sand), smaller than the quartz grains that make up the transgressive dunes (0.150 to 0.210 mm - fine sand), and their shape is moderately to well rounded.
- Na p.62, item 2.3, não está claro o que se quis dizer com “eight samples of fine sand of 2356 cm³ each”. Foi estudada só a classe areia fina? Ou a intenção foi falar em sedimentos arenosos (cuja granulação modal já foi mencionada antes, portanto não seria preciso repetir)?
- No mesmo item, em relação ao uso do separador Frantz, informar também, além das amperagens, a angulação lateral adotada: 10°, 15°, 20°?
- Nas figuras 5 (p.66) e 6 (p.69), sugere-se encurtar as legendas de rodapé, já que as informações são redundantes com o que já consta dentro delas. Basta indicar a que amostra corresponde cada gráfico e dizer que n é o número de grãos de zircão.
- Na p.71, par.3, lembrar que Bacia do Paraná não é exclusivamente paleozoica. Inclui também registro mesozoico (e.g. formações Botucatu e Serra Geral). Idem p.73, par.1.
- Na p.75, padronizar grafia para o nome do rio no texto em inglês: Rio de La Plata ou La Plata River?
- Na p.92, afirma-se que “minerais menos resistentes que o zircão, como anfibólio e cianita, denotam uma contribuição de fontes proximais, pois não suportariam as condições de transporte e retrabalhamento por longas distâncias” Esta assertiva não é necessariamente verdadeira, porém, já que anfibólio e cianita são de baixo equivalente hidráulico, portanto transportados com relativa facilidade, com tendência a se concentrarem em depósitos mais distais. Além disso, a destruição durante o transporte é um processo limitado, que muito pouco influencia a assembleia final de pesados, em comparação com outros processos como fornecimento inicial, seleção hidráulica e dissolução pós-deposicional (ver, por exemplo: Morton & Smale (1990), Morton & Hallsworth (1994, 1999), Guedes et al. (2011)).

Assinatura:



Data: 04/10/2021

Ciente do Orientador:

Ciente do Aluno:

ANEXO I

Título da Dissertação/Tese:

“Isótopos U-Pb-Hf de zircões detríticos aplicados ao estudo de proveniência do placer costeiro de São José do Norte, Rio Grande do Sul, Brasil”

Área de Concentração: Geologia Marinha

Autor: **MONIQUE APARECIDA MARCHESE RIZZI**

Orientador: Prof. Dr. Sergio Rebello Dillenburg

Examinador: Prof. Dr. Maria Luiza Correa da Camara Rosa


Data: 23/09/2021

Conceito: A

PARECER:

A Dissertação de Mestrado apresentada trata da definição da proveniência de minerais pesados que ocorrem em depósitos de placer da barreira costeira holocênica na região de São José do Norte, litoral do RS. O tema é muito pertinente e os resultados contribuem com o conhecimento da evolução da área de estudo, de áreas adjacentes e de processos geológicos. A estrutura da Dissertação está de acordo com a Norma 118 do PPGGEO/UFRGS, sendo constituída de um capítulo introdutório, do corpo principal, na forma de um artigo científico submetido à revista *Sedimentary Geology*, e por uma sessão de anexos. O capítulo introdutório está muito bem elaborado, contendo a formulação do problema, objetivos e justificativa, os quais foram redigidos de forma explícita e direta. Ainda que tenha sido explicada a motivação, como este capítulo foi redigido em Português, o ideal era que as figuras tivessem sido traduzidas. As sessões contendo a contextualização da área de estudo, o estado da arte e os materiais e métodos possuem a fundamentação necessária para o entendimento do trabalho desenvolvido, com raros erros de redação e/ou digitação que não comprometem o entendimento. A síntese dos resultados e considerações finais, fecham o capítulo, resumindo e destacando os principais aspectos e contribuições da Dissertação. Contudo, uma questão que poderia ter sido resolvida neste tópico e só veio a ser na pg. 66 (artigo) é sobre os percentuais de distribuição das idades encontradas, já que o destaque ficou somente para os percentuais de contribuição do ciclo Andino e do Neoproterozóico. Inclusive, os resumos poderiam conter essa informação ou somente informar os resultados sem indicar os valores cuja soma não contempla a totalidade. O capítulo seguinte constitui o corpo principal, na forma de um artigo científico, cuja parte inicial contém, essencialmente, as mesmas considerações do capítulo introdutório. Porém, neste foi indicada a coleta de 16 amostras, enquanto no artigo aparecem somente as 8 para as quais foram realizadas as análises geocronológicas. Seria importante explicar os critérios de seleção e possíveis contribuições dos resultados obtidos nas demais amostras. Uma questão que poderia ser discutida é: será que a menor contribuição de idades arqueanas poderia ter influência do fato das análises terem sido feitas nas bordas dos grãos? Talvez o núcleo dos grãos seja mais antigo e a priorização das bordas (o que aparentemente

ocorreu pelo que se observa na Fig. 4) tenha selecionado as idades mais recentes. Essa tendencia fica explicita na Fig. 6, ainda que picos em idades mais antigas (~2 Ga, por exemplo) apareçam. Um ponto fundamental do trabalho foi o estabelecimento das assinaturas de Hf, que permitiram diferenciar a presença de fontes com idades semelhantes, evidenciando a importância do Rio de La Plata como vetor de transporte de sedimentos para a Bacia de Pelotas (tópico 2.5.2). Neste sentido, um mapa (no tópico 2.5.3) mostrando os vetores estimados com as potenciais correlações das assinaturas encontradas (talvez derivado dos mapas da Fig. 1) auxiliaria na visualização da hipótese defendida, pois a afirmação de que a principal fonte de alimentação para a planície costeira do RS provem dos Andes fica um pouco confusa quando se consideram as porcentagens das idades que poderiam ser atribuídas ao Escudo Uruguaio Sul-Riograndese. Ainda assim, o trabalho evidencia a presença da proveniência Andina nos depósitos estudados e demonstra a aplicação de um método para a correlação entre fontes relacionadas a orogêneses ativas e inativas, o que pode ser aplicado em estudos de bacias mais antigas. Concluo, portanto, que o trabalho tem resultados excelentes, representando uma contribuição para a geologia regional e para a ciência geológica de forma mais ampla.



Assinatura:

Data: 23/09/2021

Ciente do Orientador:

Ciente do Aluno:

ANEXO I

Título da Dissertação/Tese:

“Isótopos U-Pb-Hf de zircões detríticos aplicados ao estudo de proveniência do placer costeiro de São José do Norte, Rio Grande do Sul, Brasil”

Área de Concentração: Geologia Marinha

Autor: **MONIQUE APARECIDA MARCHESE RIZZI**

Orientador: Prof. Dr. Sergio Rebello Dillenburg

Examinador: Prof. Dr. Felipe Guadagnin

Data: 29/09/2021

Conceito: A - Excelente

PARECER:

A dissertação apresenta dados inéditos sobre as idades e composição isotópica de zircões detríticos da planície costeira no sul do estado do Rio Grande do Sul. Os dados são robustos e indicam fontes mistas, relacionadas aos ciclos orogênicos Grenviliano, Brasileiro, Famatiniano, Gondwanides e Andino; o que permite a autora concluir sobre as rotas de sedimentos na Bacia do Rio da Prata no Quaternário. O trabalho foi executado seguindo o devido rigor científico no que se refere a análise de proveniência sedimentar. Pelo exposto, sou de parecer favorável à aprovação com o conceito A – Excelente.

Assinatura:



Data: 29/09/2021

Ciente do Orientador:

Ciente do Aluno: